

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Química

DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DOMINÓ CON DARDOS DE FUEGO



Memoria

Autor: Sergio Marín Peral

Director: Elsa Pastor Ferrer

Convocatoria: Enero 2019

Resumen

En este proyecto de fin de grado se diseña y se pone a punto una instalación experimental para el estudio de los dardos de fuego originados por la pérdida de contención en tuberías de gas propano, el cual forma parte del conjunto experimental para el análisis del efecto dominó provocado por el impacto de dardos de fuego en tuberías de transporte de fluidos en la industria química.

El diseño de este proyecto y su posterior aplicación de estudio pueden contribuir significativamente a prevenir accidentes que involucren dardos de fuego y/o desencadenen un efecto dominó en la industria química.

El método llevado a cabo en este proyecto ha comprendido una primera etapa del estudio del estado del arte, una segunda etapa de diseño conceptual, seguida de un diseño de detalle de componentes y finalmente, una implementación definitiva. Simultáneamente a este desarrollo se ha seguido la normativa de protección contra incendios y estipulado un manual de uso para garantizar la seguridad de los usuarios y de la instalación.

El diseño construido permite generar dardos de fuego con régimen sónico y una longitud de llama comprendida entre 1 y 3 m dentro de un laboratorio. Su estructura posibilita al operario un control de las variables requeridas para definir la geometría del dardo de fuego mediante los modelos matemáticos existentes.

Por otro lado, la instalación es capaz de adaptarse a su entorno mediante una estructura con rieles y ruedas con freno. Esto permite el desplazamiento de la instalación por el laboratorio, estabilidad a la hora de generar un dardo de fuego, movimiento vertical para adquirir distintos ángulos de impacto en el estudio del efecto dominó y, finalmente, movimiento horizontal para el almacenaje de la instalación en el laboratorio junto a un aumento de la distancia entre el operario y el dardo de fuego.

Resum

En aquest projecte de fi de grau es dissenya i es posa a punt una instal·lació experimental per a l'estudi de dolls de foc originats per la pèrdua de contenció en canonades de gas propà, el qual forma part del conjunt experimental per l'anàlisi de l'efecte dominó provocat per l'impacte de dolls de foc en canonades de transport de fluids en l'indústria química.

El disseny d'aquest procés i la seva posterior aplicació d'estudi poden contribuir significativament a prevenir accidents que involucrin dolls de foc i/o desencadenin un efecte dominó en la indústria química.

El mètode portat a terme en aquest projecte comprèn una primera etapa de l'estudi de l'estat d'art, una segona etapa de disseny conceptual, seguit d'un disseny de detall de components i finalment, una implementació definitiva. Simultàniament a aquest desenvolupament s'ha procedit a fer ús de la normativa de protecció contra incendis i estipulat un manual d'ús per garantir la seguretat de l'usuari i de la instal·lació.

El disseny construït permet generar dolls de focs amb regim sònic i una longitud de flama compresa entre 1 y 3 m dintre d'un laboratori. La seva estructura possibilita a l'operari un control de les variables requerides per a definir la geometria del doll de foc mitjançant els models matemàtics existents.

Per altra banda, la instal·lació és capaç d'adaptar-se al seu entorn per mitjà d'una estructura amb rails i rodes amb fre. Això permet el desplaçament de la instal·lació per al laboratori, estabilitat a l'hora de generar un doll de foc, moviment vertical per adquirir diferents angles d'impacte en l'estudi del efecte dominó i, finalment, moviment horitzontal per l'emmagatzematge de la instal·lació en el laboratori conjuntament a un augment de la distància entre l'operari i el doll de foc.

Abstract

In this bachelor degree thesis an experimental installation is designed and set-up for the study of jet fires caused by the loss of containment from propane gas pipelines. This experimental set-up is part of the experimental set for the study of domino effect generated by jet fires impingement in industrial pipelines. The design of this project and the subsequent contribution may significantly prevent accidents involving jet fires and/or triggering a domino effect at chemical industry.

The methodology used includes different design stages: the first stage studies the state of the art, the second stage includes a conceptual design followed by a detailed design of components and finally, a definitive implementation. Simultaneously, the fire protection regulations and the operating manual are used to guarantee the safety of the operator and the installation.

The designed set-up allows generating jet fires at sonic conditions, with flame lengths between 1 to 3 m inside the laboratory. Its structure enables to control of the required variables by the operator and to define the jet fire geometry according to the existing mathematical models.

On the other hand, the installation is adaptable to its environment thanks to a structure with a rail profile and wheels with brakes. This design allows the movement inside the laboratory, stability for jet fire generation, vertical movement to reach different angles of jet fire impingement and finally, horizontal movement to allow a safe storage of the installation and an increase of the distance between the operator and the jet fire.

Agradecimientos

En primera instancia, me gustaría agradecer a todo el grupo de investigación CERTEC por su acogida y a aquellos que han pasado una estancia durante mi proyecto. Es agradable saber que puedes contar con cualquiera de ellos.

Quiero hacer especial mención a Elsa, Eulàlia y Joaquim por permitirme hacer este proyecto y atenderme siempre que lo he necesitado. A Vahid por su ayuda y compañerismo en la elaboración del diseño, pese a traerme siempre alguna que otra noticia cargada con problemas técnicos. Y por último, a Christian Mata por disponer de toda clase de artilugios y crear un ambiente tan agradable en los despachos.

Finalmente, quiero agradecer a todas personas que están y estarán en mi vida apoyándome. No necesitan mención porque ya saben quiénes son.

Glosario

Nomenclatura

L	Longitud de la llama (m)
d	Diámetro (m)
D_{eq}	Diámetro equivalente de la llama aproximando su forma a un cilindro (m)
S	Distancia que se genera en el «lift-off» (m)
Re	Número adimensional de Reynolds (-)
P	Presión (Pa)
γ	Coeficiente entre la capacidad calorífica a presión y volumen constante del gas (c_p / c_v)
m	Flujo másico (kg/s)
T	Temperatura (K)
ρ	Densidad del gas (kg/m ³)
M_w	Peso molecular (kg/kmol)
R	Constante universal de los gases (8,314 kJ/kmol·K)
C_D	Coeficiente adimensional de descarga (-)
Z	Factor de compresibilidad

Subíndices

<i>in</i>	Interior de la tubería
<i>or</i>	Orificio de salida
<i>out</i>	Exterior de la tubería

Acrónimos

<i>CFD</i>	Dinámica de fluidos computacional
<i>FEM</i>	Método de elementos finitos
<i>DN</i>	Diámetro Nominal
<i>API</i>	<i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano de Petróleo)
<i>OD</i>	<i>Outer Diameter</i> (Diámetro externo)
<i>SWG</i>	<i>Spiral Wound Gaskets</i> (Junta espirometálica)
<i>NPT</i>	<i>National Pipe Thread</i> (Rosca nacional de tubos)
<i>INSST</i>	Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo

ÍNDICE

RESUMEN	3
RESUM	4
ABSTRACT	5
AGRADECIMIENTOS	6
GLOSARIO	8
1 INTRODUCCIÓN	16
1.1 Objetivo	16
1.2 Alcance	17
2 MARCO TEÓRICO	18
2.1 Transporte de sustancias y riesgos asociados	18
2.2 Características de un dardo de fuego	21
2.3 Efecto dominó	24
2.4 Modelos para la simulación de escenarios con efecto dominó	25
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES CON DARDOS DE FUEGO	26
3.1 Estudios experimentales con dardos de fuego	26
3.2 Estudios experimentales del efecto dominó con dardo de fuego	27
3.3 Antecedentes de diseños experimentales	29
4 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DOMINÓ EN EL LABORATORIO	33
4.1 Diseño conceptual: Especificaciones del diseño	33
4.1.1 Esquema conceptual de la instalación para el estudio del efecto dominó	33
4.1.2 Condiciones del combustible	34
4.1.3 Ubicación de la instalación experimental	34
4.1.4 Longitud de llama	35
4.1.5 Estructura y material de la instalación	35

4.1.6	Diseño seguro y sostenible	36
4.2	Diseño de detalle: Componentes, condiciones de trabajo y dimensionado de la instalación.....	37
4.2.1	Esquema preliminar: Componentes de la instalación y condiciones de trabajo	37
4.2.2	Dimensionado de la tubería: Cálculo del diámetro.....	39
4.2.3	Condiciones de propano en la instalación.....	40
4.2.4	Rango de trabajo y características de los componentes de la instalación	45
4.3	Diseño definitivo: Solución implementada.....	46
4.3.1	Selección de componentes: Especificaciones técnicas	46
4.3.2	Diseño final y ensamblaje de la instalación.....	60
5	MANUAL DE OPERACIONES DE LA INSTALACIÓN.....	65
5.1	Esquema de la instalación.....	65
5.2	Instrucciones de operación	66
5.3	Condiciones de trabajo	67
5.4	Instrucciones de seguridad.....	68
5.5	Recomendaciones de seguridad	68
6	ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL	69
6.1	Descripción general del proyecto	69
6.2	Alternativas del proyecto.....	70
6.3	Identificación y cuantificación de los posibles efectos del proyecto	70
6.4	Conclusiones.....	70
7	ANÁLISIS ECONÓMICO	71
8	CONCLUSIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Red de tuberías para el transporte de fluidos	19
Figura 2.2. Árbol de sucesos en el transporte de fluidos peligrosos en una tubería. Fuente: Ramírez-Camacho et al. (2017)	20
Figura 2.3. Dardo de fuego vertical y horizontal de propano en estado líquido-vapor. Fuente: Palacios Rosas (2011)	22
Figura 2.4. Variación con la distancia de la radiación térmica incidente (I) de un dardo de fuego de propano en función del flujo másico del combustible (m) para un diámetro de salida de 12,75 mm. Fuente: Palacios Rosas (2011)	23
Figura 2.5. Ilustración de un ejemplo del efecto dominó paso a paso. Fuente: Casal (2018b)	24
Figura 3.1. Esquema del diseño experimental por Patej y Durussel (2007)	29
Figura 3.2. Esquema y fotografía de la tubería de acero empleada por Patej and Durussel (2007)	30
Figura 3.3. Esquema del diseño experimental de Gómez-Mares (2009)	31
Figura 4.1. Diseño conceptual de la instalación. Fuente: Foroughi (2018)	34
Figura 4.2. Plano del laboratorio del edificio I de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE). Proporcionado por la Universidad Politécnica de Cataluña	35
Figura 4.3. Diseño preliminar de la instalación	38
Figura 4.4. Ilustración del flujo de gas a través de un orificio. Fuente: (Casal, 2018c)	41
Figura 4.5. Imagen del diseño de una botella de propano (35 kg) y sus dimensiones (unidades en milímetros). Fuente: Cepsa (2001)	48
Figura 4.6. Válvula de aguja de ½" SWG	49
Figura 4.7. Electroválvula normalmente cerrada de ½"	50
Figura 4.8. Fuente de alimentación fija de 24 V y 3 A. Fuente: https://diotronic.com/alim-fija-24v-3a_15173/	52
Figura 4.9. Válvula reguladora de presión	53

Figura 4.10. Manómetro para medida de presión de 0 a 6 bar	55
Figura 4.11. Rotámetro	56
Figura 4.12. Transductor de presión para medida de presión de 0 a 10 bar	58
Figura 4.13. Manguera de nilón con malla de fibra como refuerzo de 1,5 m	59
Figura 4.14. Instalación experimental para la generación de dardos de fuego	61
Figura 4.15. Soporte del panel de regulación y conexión para el suministro de propano	62
Figura 4.16. Adaptador CG1017 para la botella Repsol de propano	62
Figura 4.17. Estructura con riel para el desplazamiento horizontal de la sección final	63
Figura 4.18. Sección final de la instalación. Boquilla con rosca de 6 mm	63
Figura 4.19. Boquillas con rosca de diámetro 10 mm (izquierda) y 8 mm (derecha)	64
Figura 5.1. Esquema de los puntos de interés de la instalación	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Causas generales de accidentes comprendidos entre 1980-2006	18
Tabla 2.2. Distribución por eventos específicos comprendidos entre 1980-2006	21
Tabla 3.1. Estudios experimentales relevantes de la geometría del dardo de fuego en ausencia de viento cruzado correspondientes a flujos subsónicos, sónicos o supersónicos	26
Tabla 3.2. Estudios experimentales relevantes de la exposición al fuego en tanques presurizados	28
Tabla 4.1. Componentes necesarios para la instalación: Función, descripción y ubicación	37
Tabla 4.2. Diámetros óptimos para la instalación obtenidos mediante la geometría de llama	40
Tabla 4.3. Caudales máxicos a velocidad sónica para cada diámetro	43
Tabla 4.4. Condiciones de presión y densidad del propano a lo largo de la instalación.	44

Tabla 4.5. Variación del flujo volumétrico en la instalación con las posibles opciones de salida.	44
Tabla 4.6. Dimensiones límite del recipiente de propano	45
Tabla 4.7. Dimensionado de la tubería para el transporte de propano	45
Tabla 4.8. Rango de trabajo de los componentes	46
Tabla 4.9. Comparación entre distintos materiales para la conducción de propano	47
Tabla 4.10. Información técnica de la válvula de aguja	49
Tabla 4.11. Información técnica de la electroválvula	51
Tabla 4.12. Información técnica de la fuente de alimentación lineal	52
Tabla 4.13. Información técnica del regulador de presión	53
Tabla 4.14. Información técnica del manómetro	55
Tabla 4.15. Información técnica del rotámetro	57
Tabla 4.16. Información técnica del sensor de presión	58
Tabla 4.17. Información técnica del tubo flexible	60
Tabla 5.1. Leyenda del esquema de la instalación	66
Tabla 5.2. Datos técnicos de la instalación experimental para generar dardos de fuego	67
Tabla 7.1. Coste asociado a recursos humanos	71
Tabla 7.2. Coste asociado a los materiales, la construcción y servicio de compañías	72

1 INTRODUCCIÓN

Como consecuencia del desarrollo industrial, la necesidad del transporte de materias peligrosas como materia prima o producto en la industria ha ido aumentando progresivamente durante las últimas décadas. Este crecimiento ha provocado un incremento en la frecuencia de los accidentes graves (incendios, fugas tóxicas y explosiones). Dentro de los accidentes con fuego, el dardo de fuego posee una mayor probabilidad de ocurrencia (Ramírez-Camacho *et al.*, 2017).

La importancia en el análisis experimental de este tipo de incendios reside en el peligro potencial que presenta un dardo de fuego para todo equipamiento que esté a su alrededor, contribuyendo en gran medida al aumento de la probabilidad de que suceda un efecto dominó y, por ello, al escalado de daños.

En este trabajo se diseña y se pone a punto una instalación experimental para el estudio de los dardos de fuego originados por la pérdida de contención en tuberías de gas propano, el cual forma parte del conjunto experimental para el análisis del efecto dominó provocado por el impacto de dardos de fuego en tuberías de transporte de fluidos en la industria química.

1.1 Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de una instalación experimental generadora de dardos de fuego como parte de una instalación experimental para el análisis del efecto dominó iniciado por dardos de fuego. El escenario a estudiar es un impacto de un dardo de fuego, generado mediante la combustión de propano, en una tubería para el transporte de fluidos en la industria química.

Para cumplir el objetivo principal es necesario abordar los siguientes objetivos específicos:

- Estado del arte: Revisión bibliográfica de experimentación con dardos de fuego.
- Diseño conceptual: Primer esquema de la instalación y especificaciones del diseño.
- Diseño de detalle: Desarrollo de un segundo esquema más detallado y el cálculo de las condiciones de trabajo y el dimensionado de la tubería de propano.
- Diseño definitivo: Explicación de los componentes seleccionados y esquema final de la instalación.
- Implementación del diseño y manual de operaciones.

- Seguridad de la instalación. Aplicación de normativa para garantizar la seguridad de la instalación.

1.2 Alcance

La presente memoria consta de las siguientes partes:

- Marco teórico del transporte de materias peligrosas, características dardos de fuego y efecto dominó.
- Recopilación bibliográfica de estudios experimentales con dardos de fuego y efecto dominó.
- Estudio, diseño y selección de los componentes de la instalación.
- Manual de operaciones para la puesta en marcha de la instalación.
- Análisis del impacto ambiental y nivel de riesgo del almacenamiento de propano.

Queda fuera del alcance de este proyecto el diseño del módulo conformado por la tubería de transporte de fluidos necesario para el estudio del efecto dominó.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Transporte de sustancias y riesgos asociados

Existen diferentes métodos para el transporte de sustancias: tubería, carretera, ferrocarril o barco. Cuando la materia prima transportada se considera peligrosa, como un fluido inflamable o tóxico, una pérdida de contención conlleva un riesgo para el medioambiente, el equipamiento y/o a la gente en función del tipo de sustancia y las características de la zona.

El transporte por tuberías se destaca por su uso para líquidos y gases. Cabe destacar que una de las diferencias más notables en su uso es el promedio más bajo de grandes accidentes respecto a los demás métodos de transporte (Ramírez-Camacho *et al.*, 2017). No obstante, los grandes accidentes producidos en tuberías pueden llegar a ser los más peligrosos.

Los accidentes más graves son causados por un primer suceso o evento. Ramírez-Camacho *et al.* (2015) realiza un análisis histórico (1980-2006) de accidentes en tuberías, haciendo especial hincapié en los sucesos iniciadores que pueden causar accidentes en el transporte por tuberías (Tabla 2.1) como excavaciones, corrosiones, envejecimiento, derrumbes, etc.

Tabla 2.1. Causas generales de accidentes comprendidos entre 1980-2006

Causa general	Número de entradas	% del total
Causas generales conocidas	759	71,4
Causas generales desconocidas	304	28,6
	Número de entradas	% de las causas conocidas ^a
Actividad de terceros	286	37,7
Corrosión	159	20,9
Fallo mecánico	148	19,5
Error operacional/humano	64	8,4
Peligros naturales	53	7,0
Fallo del equipamiento	52	6,9

^a El porcentaje total no es 100% porque 3 entradas involucran más de una causa general.

Fuente: Ramírez-Camacho *et al.* (2017).

Tal como muestra la tabla anterior, gran parte de los casos descritos suceden por causas externas (actividad de terceros) y el resto a causa de fallos de la propia instalación (fallo mecánico, corrosión, etc.).

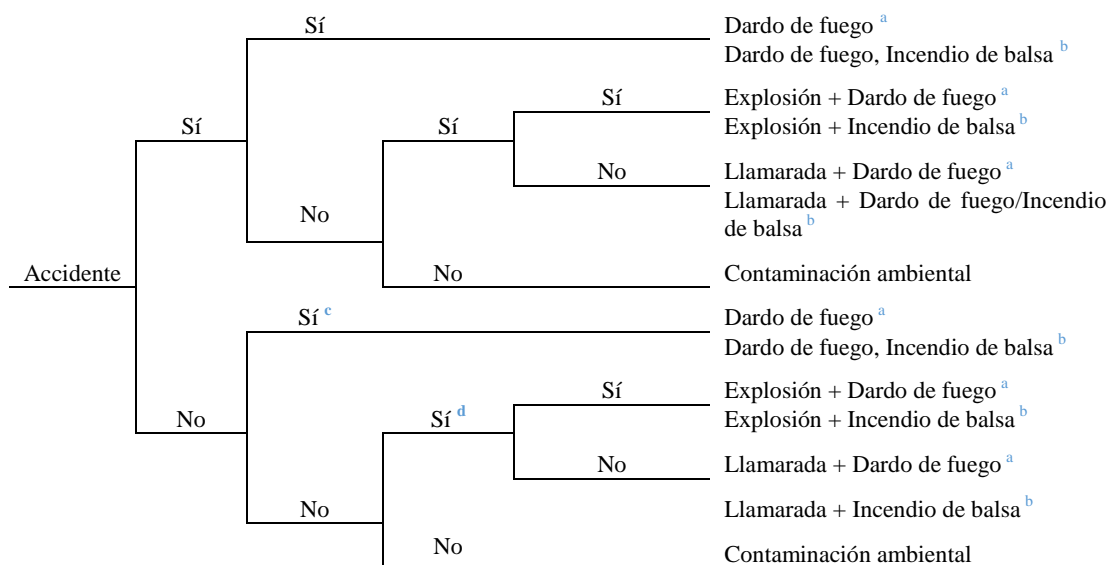
La implementación de tuberías para el transporte de fluidos se utiliza tanto en la propia industria como para conectar distintas regiones (Figura 2.1). Este tipo de infraestructuras con una distribución de tuberías en paralelo posee distancias de separación muy pequeñas entre tubería y tubería o entre tubería y equipamiento industrial.



Figura 2.1. Red de tuberías para el transporte de fluidos. La fotografía de la izquierda muestra la planta química de Cepsa en Shanghái. Fuente: <https://www.cepsa.com/es/tecnologia/proyectos/proyecto-china>. La fotografía de la derecha muestra el oleoducto transístmico de la Petroterminal de Panamá S.A al noroeste de la República de Panamá. Fuente: <http://www.petroterminal.com/index.php/es/servicios/oleoducto-transistmico>

Una vez causado el primer suceso de un accidente existen diferentes escenarios posibles que pueden afectar a tuberías o equipos ubicados cerca del suceso (Figura 2.2). Cada escenario depende en gran medida de la posición de la tubería (en la superficie o bajo tierra), las propiedades de la materia transportada (inflamabilidad, toxicidad y volatilidad) y el tipo de pérdida de contención (fuga, rotura catastrófica, etc.). Las condiciones ambientales y las circunstancias del entorno (urbano o rural) también contribuyen a generar un mayor o menor riesgo (Ramírez-Camacho *et al.*, 2017).

Evento inicial	Tubería aérea	Ignición inmediata	Ignición retardada	Aceleración del frente de llamas	Escenario accidental
----------------	---------------	--------------------	--------------------	----------------------------------	----------------------



^a Gases inflamables.

^b Materiales líquidos inflamables y volátiles.

^c Solo si el jet crea un cráter.

^d Si hay un cráter o si el flujo de gas/vapor atraviesa hasta alcanzar la atmósfera.

Figura 2.2. Árbol de sucesos en el transporte de fluidos peligrosos en una tubería. Fuente: Ramírez-Camacho et al. (2017)

Para complementar la información que proporciona la figura anterior es interesante tener en cuenta la Tabla 2.2, que muestra qué tipos de accidentes de pérdida de contención y accidentes que involucren fuego son más frecuentes.

Como se aprecia en la Figura 2.2 y Tabla 2.2, la fuga de fluidos en una tubería es la pérdida de contención más frecuente. El escenario más habitual donde se involucra fuego es el denominado como «dardo de fuego». A parte de su gran probabilidad de aparición, sus características contribuyen al agravamiento del accidente ocasionado

Tabla 2.2. Distribución por eventos específicos comprendidos entre 1980-2006

Evento específico	Número de entradas	% de la categoría	% del total
Accidentes con al menos uno de los siguientes tipos de liberación			
Fuga	431	40,5	40,5
Rotura catastrófica	292	27,5	27,5
Derrame	260	24,5	24,5
Explosión física	51	4,8	4,8
Desconocido	29	2,7	2,7
Accidentes con al menos uno de los siguientes tipos de fuego			
Dardo de fuego	139	54,3	13,1
Llamarada	55	21,5	5,2
Incendio de balsa	39	15,2	3,7
Bola de fuego	32	12,5	3,0
Desconocido	49	19,1 ^a	4,6

^a El porcentaje total no es 100% porque 56 entradas involucran más de un tipo de fuego.

Fuente: Ramírez-Camacho *et al.* (2017).

2.2 Características de un dardo de fuego

La combustión de un escape a presión o alta velocidad de un gas, un líquido o una mezcla líquido-vapor es conocida por el término «dardo de fuego» (*jet fire* en terminología inglesa). Este tipo de incendio en una tubería muestra turbulencias en el momento de su ignición, a causa de que el fluido posee una mayor presión o una gran velocidad, favoreciendo la entrada de grandes cantidades de aire y, a su vez, mejorando la combustión en comparación a un incendio de balsa alcanzando valores de temperatura en su superficie alrededor de 800 K (Palacios Rosas, 2011).

A diferencia del incendio de balsa, que puede llegar a ocupar un gran volumen, el dardo de fuego suele ser normalmente más pequeño con una forma característica, recordando ligeramente a la de un lanzallamas (Figura 2.3). Suele asimilarse, de forma geométrica, a un cilindro o un cono truncado.

La distancia comprendida entre la salida del combustible y el inicio de la llama visible se llama «lift-off», zona donde únicamente se expulsa combustible. Esto es debido a que el oxígeno necesario para alcanzar el límite inferior de inflamabilidad (LII) no se ha mezclado con el

combustible. Seguido del «lift-off» se encuentra la distancia comprendida entre el inicio de la llama visible y su final, nombrada como longitud de la llama.



Figura 2.3. Dardo de fuego vertical y horizontal de propano en estado líquido-vapor. Fuente: Palacios Rosas (2011)

La velocidad de salida de gas tiene una cierta influencia en algunas características (altura, anchura, «lift-off», momento lineal y flotabilidad). Los dardos de fuego involucrados en accidentes en muchas ocasiones son sónicos, para alcanzar esta condición la presión interna de la tubería debe ser superior a la presión exterior, lo cual aumenta la velocidad del gas hasta su velocidad crítica. Esta condición se cumple en la mayoría de instalaciones (Gómez-Mares, 2009).

El comportamiento de un dardo de fuego se rige en base a su flotabilidad y su momento lineal. A flujos elevados el momento lineal del combustible (gas) predomina en el proceso determinando el comportamiento de este tipo de llamas. A bajas velocidades la flotabilidad cobra importancia a causa de la diferencia de densidades que genera la combustión (la densidad decrece a medida que aumenta la distancia del orificio hasta el final de la llama).

Incrementar en exceso el flujo de salida eleva la llama desde la fuente hasta una posición más lejana. En esa posición la velocidad de combustión y la velocidad promedio de salida son iguales. Sin embargo, si el flujo de salida vuelve a aumentar puede, según el diámetro de salida, producirse un «blow-out». Este fenómeno es el resultado de que la velocidad de combustión no se mantenga a causa del incremento del flujo y, en esas condiciones, la llama se extinga a causa de un desplazamiento de concentraciones en las que el combustible esté fuera del rango del límite de inflamabilidad.

La importancia de su comportamiento radica en su contribución al agravamiento de un accidente. Como se expone en el Apartado 2.1, las infraestructuras de tuberías para el transporte

de fluidos son rodeadas de equipamiento industrial u otras tuberías ubicadas en paralelo aumentando el riesgo de exposición ante un impacto por un dardo de fuego.

El impacto de un dardo de fuego puede generar un daño severo ante un equipo a causa de su energía térmica, incrementando las probabilidades de causar un efecto dominó. La transmisión de calor se produce esencialmente por convección y radiación en función de las condiciones del incendio. (Palacios Rosas, 2011). La convección producida en el dardo de fuego posee un valor elevado causado por las altas velocidades del fluido y su relativa buena combustión.

Por otro lado, la radiación térmica emitida es importante únicamente a muy cortas distancias, porque decrece muy rápido cuanto más alejado se está de la llama. Según la bibliografía, el valor propuesto para un dardo de fuego de propano en fase gas y régimen sónico corresponde a 300 kW/m^2 (Casal, 2018a).

La Figura 2.4 muestra valores reales de la radiación térmica donde se muestra que la radiación captada por los sensores de radiación térmica disminuye conforme se aumenta la distancia respecto al dardo de fuego. Cabe resaltar la influencia causada por el flujo másico, donde a mayor flujo mayor radiación térmica.

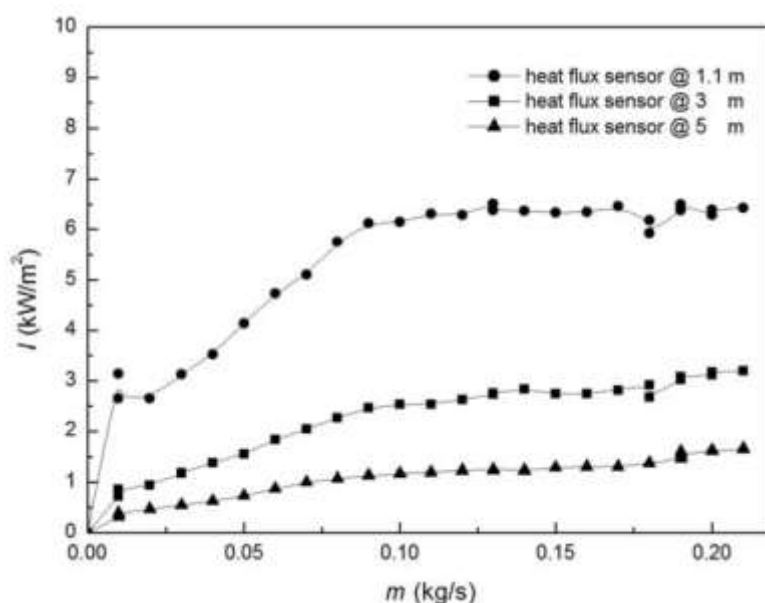


Figura 2.4. Variación con la distancia de la radiación térmica incidente (I) de un dardo de fuego de propano en función del flujo másico del combustible (m) para un diámetro de salida de 12,75 mm. Fuente: Palacios Rosas (2011)

2.3 Efecto dominó

A lo largo de los apartados anteriores se menciona el término «efecto dominó» como un efecto secundario que produce un escalado de consecuencias en escenarios accidentales (Figura 2.5).

El efecto dominó se ha definido en la literatura mediante los siguientes términos específicos (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2011).

- **Seveso II Directive, Artículo 8.** «Situaciones en las que un accidente en una industria ha ocurrido a causa del impacto de un accidente en otra industria, ya sea adyacente o cercana».
- **AICHE-CCPS (Instituto Americano de Ingenieros Químicos – Centro para Seguridad de Procesos Químicos).** «Incidente que comienza en un ítem y puede afectar a otros ítems cercanos a través de un impacto térmico, explosivo o de fragmentos».
- **Delvosalle, Fievez, and Benjelloun (1998).** «Cascada de eventos en los que las consecuencias del accidente, o los accidentes previos, son incrementadas por la sucesión de uno o más, promoviendo un accidente mayor».

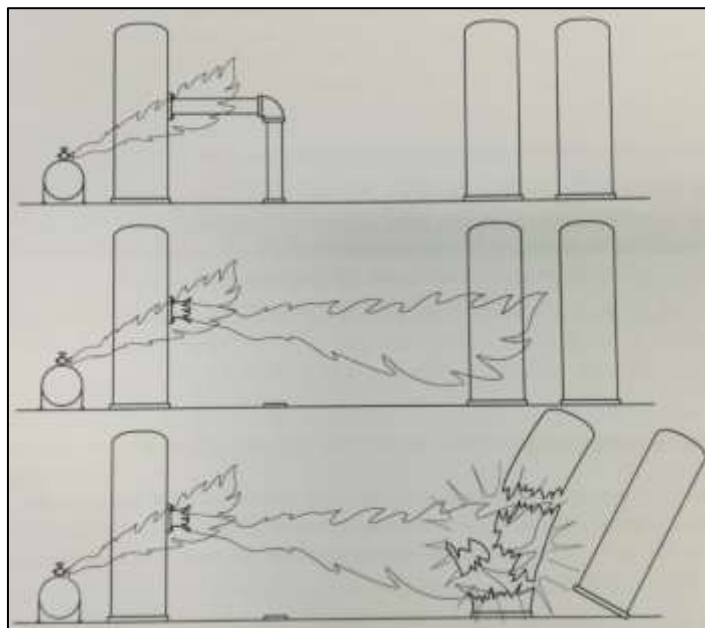


Figura 2.5. Ilustración de un ejemplo del efecto dominó paso a paso. Fuente: Casal (2018b)

Existen términos complementarios para clasificar los efectos según la zona de afectación. El criterio de Reniers (2010) daba lugar a «internal domino», cuando el accidente ocurre dentro de los límites de la planta química, y el «external domino», cuando uno o más accidentes secundarios ocurren fuera de los límites de la zona en la que ocurre el primer accidente.

Los efectos causados por un «external domino» son más severos, ya que se propagan por una mayor zona e involucran más equipamientos, que los causados por un «internal domino». Por otra parte, suelen ser menos frecuentes y poseen un complicado modelaje matemático, pero la investigación de este tipo de evento es difícil al estar involucradas una multitud de compañías causando que sea un efecto poco atendido experimentalmente (Darbra, Palacios y Casal, 2010).

2.4 Modelos para la simulación de escenarios con efecto dominó

Las simulaciones de computación actuales para el estudio y modelado del efecto dominó en un escenario hacen uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) y del método de elementos finitos (FEM) como herramientas. El primer método resuelve las ecuaciones de fluidos de Navier-Stokes (conservación de masa, conservación del momento y conservación de la energía) para escenarios en un espacio tridimensional y el segundo es un método numérico utilizado en conjunto a las herramientas CFD, discretizando la zona de interés en diversas porciones que forman una cuadrícula denominada malla para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales (Landucci *et al.*, 2013).

Las primeras simulaciones mediante herramientas CFD se realizan comúnmente en los análisis de incendio para evaluar los posibles escenarios bajo distintas condiciones de contorno, ya que proporcionan información detallada de los efectos del fuego pudiendo considerar geometrías complejas y representar incendios de pequeña a gran escala. En consecuencia, los datos obtenidos en la simulación requieren ser cuantificados con tal de evaluar las capacidades predictivas haciendo uso de las discrepancias entre los datos de la simulación y los datos experimentales, permitiendo ajustar la simulación hasta mejorar la precisión de los resultados antes de su uso para situaciones reales (Rengel *et al.*, 2018).

Por ello, el desarrollo de este proyecto y su posterior aplicación de estudio pueden contribuir significativamente a la validación de las simulaciones mediante herramientas CFD aportando datos experimentales de escenarios que involucren dardos de fuego y/o desencadenen un efecto dominó.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES CON DARDOS DE FUEGO

Existen multitud de autores que han estudiado, tanto teórica como experimentalmente, un dardo de fuego con tal de desarrollar modelos para caracterizar las propiedades físicas de la llama. Dentro de estos autores solo unos pocos han estudiado el comportamiento del impacto de la llama a un equipo y de esos únicamente Patej y Durussel (2007) estudian el efecto térmico de la llama al impactar contra una tubería con un líquido en movimiento.

3.1 Estudios experimentales con dardos de fuego

La gran mayoría de estudios se basan en el estudio de la geometría de llama e intentan desarrollar modelos matemáticos que describan su forma y su tamaño. Según Gómez Mares *et al.* (2010), el 60% de los casos registrados en cuatro base de datos Europeas de accidentes involucraban el uso de gas licuado del petróleo (GLP) como combustible. Este hecho remarca la importancia de investigar acerca del comportamiento de un dardo de fuego, dada su alta frecuencia en los accidentes, generados mediante combustible GLP.

Foroughi (2018) y Palacios Rosas (2011) realizan una búsqueda de antecedentes bibliográficos (Tabla 3.1) de los estudios experimentales con la generación de dardos de fuego creando dos clasificaciones según la longitud de la llama: escala pequeña y escala grande.

Tabla 3.1. Estudios experimentales relevantes de la geometría del dardo de fuego en ausencia de viento cruzado correspondientes a flujos subsónicos, sónicos o supersónicos

Escala	Referencia	Combustible	Diámetro del orificio (mm)	Longitud de la llama (m)	Proyección
Pequeña	Hawthorne et al. (1949) ^a	Acetileno, monóxido de carbón, gas ciudad, hidrogeno, propano, mezcla de CO ₂ -gas ciudad y H ₂ -Propano	3 – 8	hasta 1	Vertical
	Baev et al. (1974) ^{a, b, c}	Hidrogeno	1 – 16,65	0,08 – 3,12	Vertical
	Backer and Liang (1981) ^{a, b}	Acetileno, monóxido de carbón, etano, etileno, hidrogeno, metano y propano	0,69 – 4,57	hasta 1	Vertical/ Horizontal

	Kalaghatgi (1984) ^{a, b}	Etileno, hidrogeno, metano y propano	1,08 – 10,1	hasta 1,7	Vertical
	Santos and Costa (2005) ^a	Etileno y propano	5 – 8	hasta 1,7	Vertical
	Imamura et al. (2008) ^b	Hidrogeno	1 – 4	hasta 1,8	Horizontal
Grande	Gore et al. (1974) ^b	Gas Natural	1 – 16,65	hasta 25	Vertical
	Sonju and Hustad (1984) ^a	Metano y propano	10 – 80	hasta 8	Vertical
	McCaffrey and Evans (1986) ^{a, c}	Metano	38 – 102	hasta 23,5	Vertical
	Sugawa and Sakai (1997) ^a	Propano	6.5 – 27,6	hasta 8	Vertical
	Schefer et al. (2006) ^b	Hidrogeno	7,94	hasta 5,6	Vertical
	Schefer et al. (2007) ^b	Hidrogeno	5,08	hasta 10,7	Vertical
	Mogi and Horiguchi (2009) ^{a, b}	Hidrogeno	0,1 – 4	hasta 6,5	Horizontal
	Gómez-Mares et al. (2009) ^{a, b}	Propano	12,75 – 30	2,2 – 8,1	Vertical
	Palacios et al. (2010) ^{a, b}	Propano	10 – 43	hasta 10	Vertical
	Laboureur et al. (2016) ^a	Propano	191	1 – 10	Vertical /Horizontal

^a Flujo subsónico.

^b Flujo sónico.

^c Flujo supersónico.

Fuente: Adaptado de Foroughi (2018) y Palacios Rosas (2011).

Los estudios expuestos abarcan casi por completo la experimentación del dardo de fuego con una posición vertical de la llama. Cabe recalcar que el combustible más utilizado es el propano, seguido por el hidrógeno.

Por otro lado, más de la mitad de los estudios utilizan un flujo subsónico o supersónico cuando los dardos de fuego más comunes se muestran en flujo sónico. Esto provoca que la predicción de la geometría de la llama contenga ligeros errores al aproximarse a un caso real.

3.2 Estudios experimentales del efecto dominó con dardo de fuego

Landucci, Cozzanix y Birk (2013) realizan una búsqueda de antecedentes bibliográficos (Tabla 3.2) de los estudios experimentales del efecto dominó por el impacto por dardo de fuego. Detallan, además, que el equipamiento para el almacenamiento y el transporte de fluidos utilizado habitualmente en las industrias son tanques atmosféricos y tuberías respectivamente.

Pese a ello, los estudios realizados respecto a la exposición ante el fuego han sido enfocados mayoritariamente hacia tanques presurizados.

Tabla 3.2. Estudios experimentales relevantes de la exposición al fuego en tanques presurizados

Referencia	Fluido almacenado	Tanque ^{1,2}	Revestimiento aislante	Tipo de fuente	Exposición al fuego
Townsend et al. (1974)	Propano	A = 3,05	Desprotegido	Incendio de balsa (JP-4)	Totalmente envuelto
Droste et al. (1999)	Propano	A = 2,9	Desprotegido	Incendio de balsa (Fueloil)	Totalmente envuelto
Moodie et al. (1988)	GLP	A = 1,7	Desprotegido	Incendio de balsa (Keroseno)	Totalmente envuelto
Droste and Schoen (1988)	Propano	A = 1,25	Desprotegido	Incendio de balsa (Fueloil)	Rodeado
Persand et al. (2001)	Propano	A = 1,2	Desprotegido	Dardo de fuego (Propano)	Parcialmente envuelto
Birk et al. (2006a)	Propano	A = 0,953	Desprotegido	Quemador (Butano)	Parcialmente envuelto
Birk and Van de Steen, (2006)	Propano	A = 0,953	Desprotegido	Quemador (Butano)	Parcialmente envuelto
Faucher et al. (1993)	Propano	B = 1,7	Intumescente (10 mm de grosor)	Quemador (Butano)	Totalmente envuelto
Faucher et al. (1993)	Propano	B = 1,7	Cemento (38 mm de grosor)	Quemador (Butano)	Totalmente envuelto
Faucher et al. (1993)	Propano	B = 1,7	Cemento (35 mm de grosor)	Quemador (Butano)	Totalmente envuelto
Droste and Schoen (1988)	Propano	A = 1,25	Lana de roca (38 mm de grosor)	Incendio de balsa (fueloil)	Rodeado
Landucci et al. (2009c)	GLP (Grado A)	A = 1,25	Intumescente (10 mm de grosor)	Incendio de balsa (diésel)	Totalmente envuelto
Townsend et al. (1974)	Propano	A = 3,05	Poliuretano (3,2 mm de grosor)	Incendio de balsa (JP-4)	Totalmente envuelto
Birk et al. (2006b)	Propano	A = 0,953.	Fibra cerámica (38 mm de grosor)	Quemador (Butano)	Parcialmente envuelto

¹ La especificación A hace referencia al diámetro de los tanques cilíndricos en posición horizontal (m).

² La especificación B hace referencia al diámetro de los tanques esféricos (m).

Fuente: Adaptado de Foroughi (2018) y Landucci, Cozzanix y Birk (2013).

Los estudios expuestos abarcan casi por completo la experimentación con tanques cilíndricos en posición horizontal con propano en su interior. La primera parte estudia el efecto dominó ante tanques presurizados sin revestimiento y la segunda parte estudia la exposición al fuego utilizando protección activa.

Únicamente se hace uso de dardos de fuego en una única ocasión y los estudios realizados con quemador no pueden considerarse como dardo de fuego en un caso real por ser una llama de premezcla en vez de difusión.

3.3 Antecedentes de diseños experimentales

Para un diseño adecuado y seguro es interesante comprobar los diseños experimentales hechos con anterioridad.

Patej y Durussel (2007) diseñaron la instalación experimental (Figura 3.1) con el objetivo de generar modelos que permitan el cálculo de la transferencia de calor que soporta una tubería afectada por un dardo de fuego (flujo subsónico) y determinar de forma precisa las características del dardo de fuego. Dentro de los estudios experimentales expuestos en los apartados anteriores únicamente este diseño se aproxima a la instalación experimental global deseada.

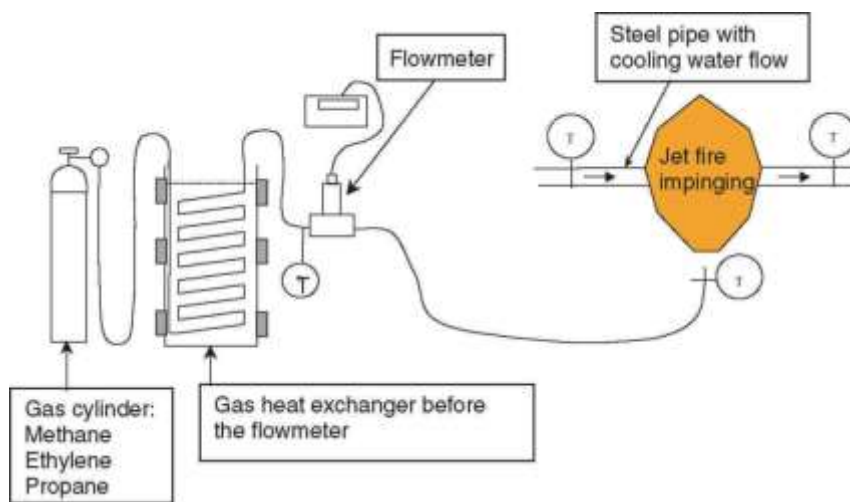


Figura 3.1. Esquema del diseño experimental por Patej y Durussel (2007)

Su diseño experimental está compuesto por dos módulos: el primer módulo es un equipamiento para generar dardos de fuego y el segundo módulo lo compone una tubería equipada con termopares.

El primer módulo se compone de una bombona industrial B 50 (metano, etileno y propano) para proporcionar el combustible necesario. A continuación se aplica un intercambiador de calor para obtener el combustible en fase gas. Seguidamente se incorpora un caudalímetro que posee una válvula reguladora con tal de controlar la velocidad de salida del gas al mismo tiempo que obtiene la medida correcta del flujo.

El segundo módulo (Figura 3.2) se compone de una tubería de acero de 34 mm con un flujo de agua a temperatura ambiente a través. El flujo posee un valor de 12 kg/min y una velocidad comprendida entre 0 y 0,5 m/s. La instalación presenta tres secciones de 10 cm cada una para la toma de datos: sección A, B y C. Cada sección posee dos pares de sensores de temperatura en la

pared superior e inferior y, simultáneamente, cada par está compuesto por un termopar colocado en la superficie interna y otro en la superficie externa de esa pared. Al final de la tubería se hace uso de un colector para los conectores de cada termopar.

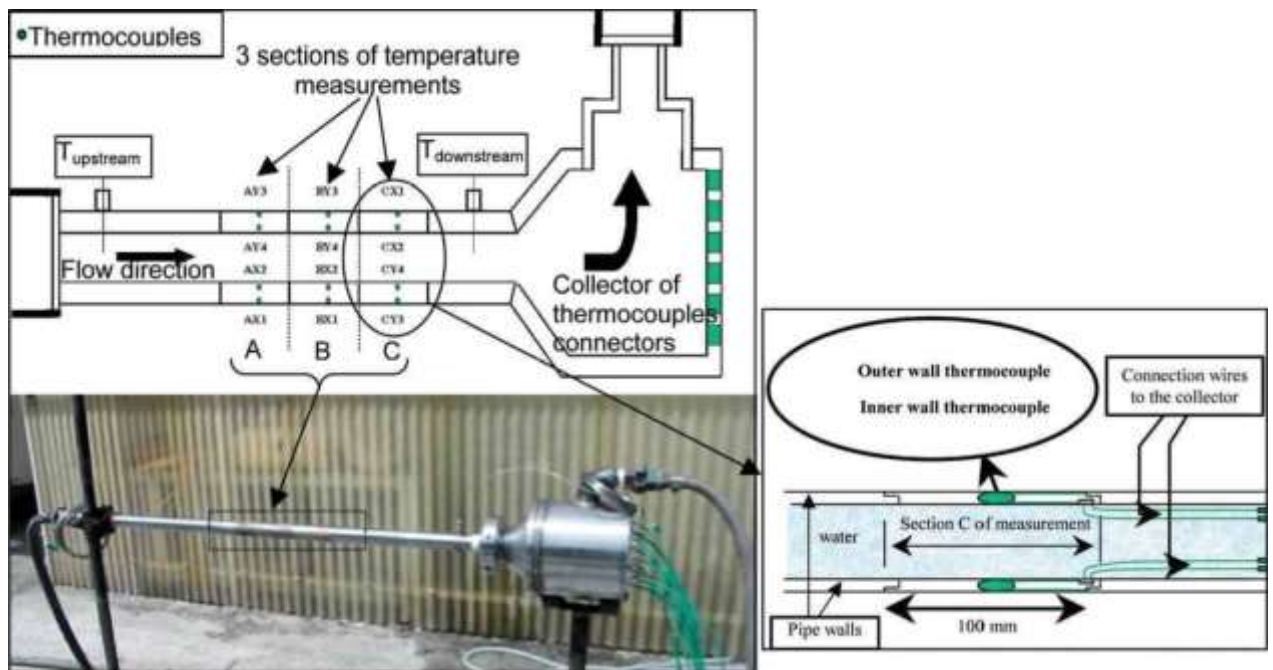


Figura 3.2. Esquema y fotografía de la tubería de acero empleada por Patej and Durussel (2007)

El siguiente diseño de referencia a utilizar es de Gómez Mares (2010) y Palacios (2011). El diseño experimental (Figura 3.3) se centra únicamente en la generación de dardos de fuego con propano. Se escogen ambos proyectos como referencia por disponer de información detallada de los componentes y métodos utilizados, una revisión bibliográfica de los estudios experimentales realizados y datos experimentales con propano como combustible.

Ambos trabajos, además, sirven como puntos de partida para otros proyectos, como por ejemplo el diseño experimental utilizado por Laboureur *et al.* (2016).

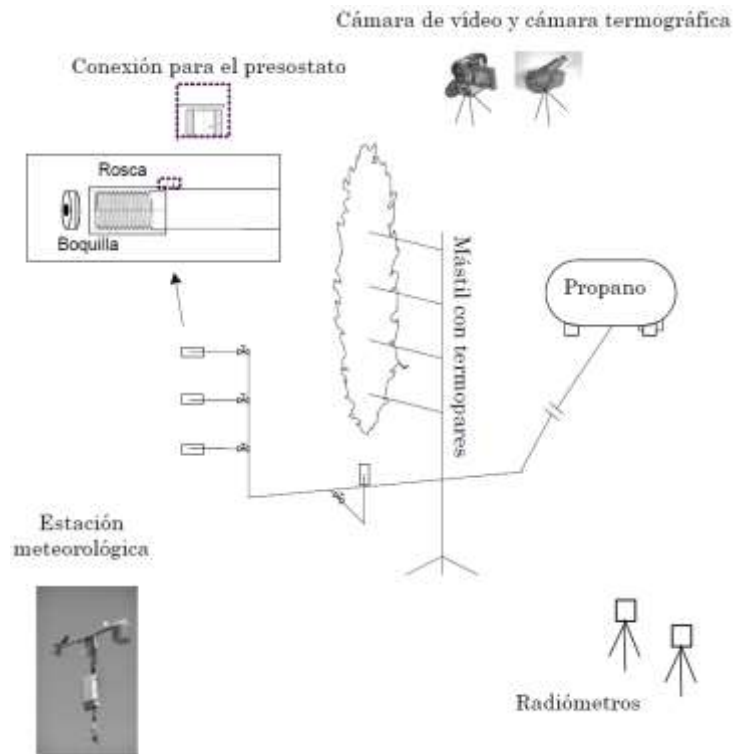


Figura 3.3. Esquema del diseño experimental de Gómez-Mares (2009)

Este diseño experimental hace uso de un tanque de 4 m³ (1,15 m de diámetro y 3,6 m de longitud) que suministra propano líquido a través de una tubería de 50 m de longitud hasta llegar al agujero de salida. El líquido de propano se encuentra aproximadamente a 25 °C (Temperatura ambiente) y 9,5 bar (Presión del equilibrio líquido-vapor).

Durante el recorrido el propano se evapora (composición del 97% de propano, 1,5% butano y 1,5% de otros gases como hidrógeno, metano y nitrógeno) fluyendo como gas a la salida durante el tiempo suficiente para el ensayo hasta emerger como flujo bifásico, cambiando las características del dardo de fuego. Debido a la evaporación del propano la tubería quedaba recubierta de escarcha causando un tiempo de espera entre cada ensayo.

Al final del recorrido se emplean cuatro tuberías de salida con una válvula manual de seguridad cada una: tres salidas para la proyección horizontal de dardos de fuego y una salida para la proyección vertical. Para variar el dardo de fuego cada salida utiliza boquillas con diámetros comprendidos entre 2 y 35 mm.

En cada salida la instalación dispone de un sensor de presión situado a 5cm del orificio para conocer la presión. El sensor de presión utilizado es el modelo UPA 5 (0434-011) de la compañía Barksdale. Posee un rango de medición de 0 a 10 bar con una precisión $\pm 0,5\%$ para temperaturas de trabajo entre -25 y 125°C, una alimentación de 12 a 36 Vdc y una señal de

salida de 4 a 20 mA. Material de acero inoxidable, cerámica Al₂O₃ y anillo vitón. Para su protección frente a las llamas se cubría con lana de roca.

La temperatura en el orificio de salida era constantemente controlada mediante un termopar tipo K sin recubrimiento localizado a escasa distancia de la propia salida. La composición de los materiales es de una aleación de níquel-cromo capaces de poder medir temperaturas comprendidas entre -200 y 1.250 °C.

Las medidas del caudal másico fueron hechas en primera instancia de forma indirecta mediante un caudalímetro ultrasónico, pero los ensayos con este instrumento de medida presentaron errores para el propano tanto en fase líquido-vapor como para la fase gas debido a su densidad. Finalmente el caudal volumétrico fue calculado mediante los valores de presión y temperatura en la salida de la instalación, conocidas por los aparatos de medición mencionados anteriormente, aplicando los modelos matemáticos de Casal (2018c, 2018a) para la generación de dardos de fuego en condiciones de velocidad sónica y gas ideal.

4 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DOMINÓ EN EL LABORATORIO

En este apartado se desarrollará paso a paso el diseño de la instalación experimental. En primer lugar se describe el diseño conceptual, donde se exponen las especificaciones iniciales a las que debe ajustarse la instalación. Una vez establecido el diseño conceptual se continúa con el diseño al detalle, donde se realizan los cálculos necesarios para el dimensionamiento de la instalación. Posteriormente al dimensionamiento se detalla una selección de los componentes necesarios que deben ser incluidos, así como las características necesarias. Finalmente, se describe el diseño final junto a las decisiones tomadas.

4.1 Diseño conceptual: Especificaciones del diseño

En este apartado se expone un primer esquema base y las especificaciones necesarias a llevar a cabo. Las especificaciones establecen el tipo de combustible a utilizar y sus características, la ubicación de la instalación experimental, la longitud de llama requerida para este proyecto y los requisitos del diseño (consideraciones del material, ergonomía del diseño, seguridad de la instalación y sostenibilidad económica y ambiental).

4.1.1 Esquema conceptual de la instalación para el estudio del efecto dominó

La Figura 4.1 muestra un esquema conceptual de los dos módulos que componen la instalación para el estudio del efecto dominó. Este esquema sirve como punto de partida para el diseño del primer módulo de la instalación, es decir, el generador de dardos de fuego.

El esquema del generador de fuego es influenciado por los diseños expuestos en el Apartado 3.3. El combustible es suministrado a partir de un recipiente de propano para hacerlo fluir a través de la tubería hasta alcanzar el agujero de salida. La instalación dispone de una válvula manual como elemento de control, una electroválvula como elemento de seguridad y un manómetro y caudalímetro como elemento de medición.

La tubería posee una unión T en su tramo final permitiendo la salida del dardo de fuego en dirección horizontal o vertical.

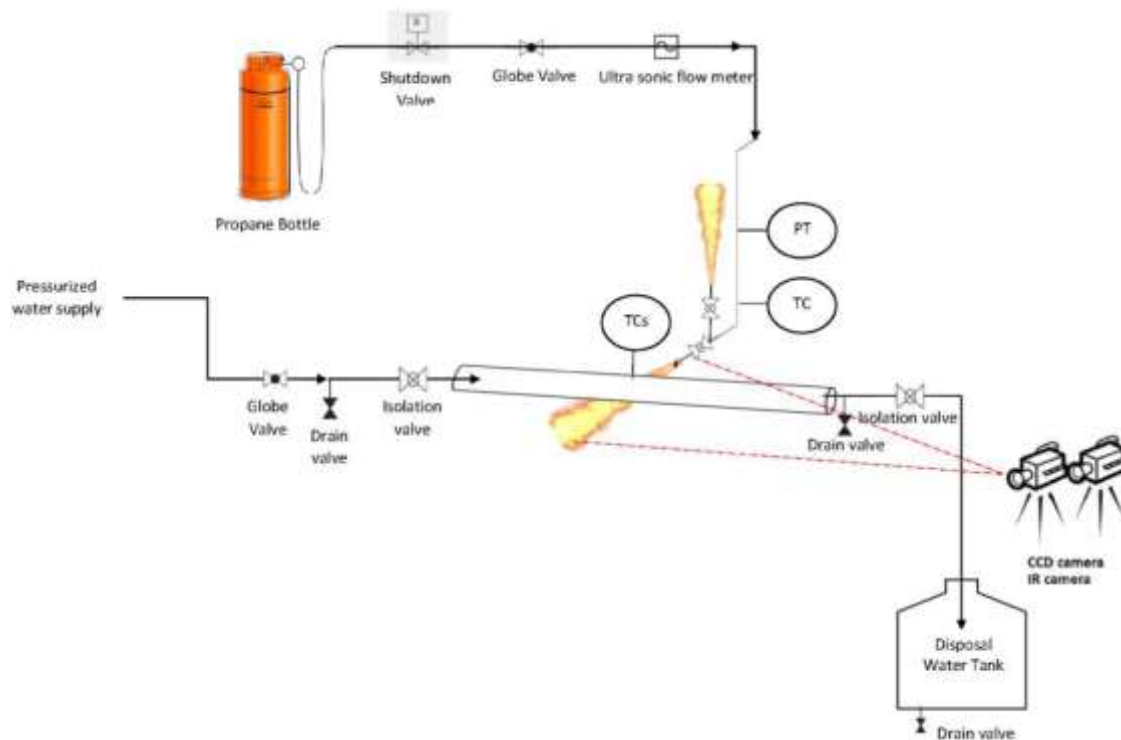


Figura 4.1. Diseño conceptual de la instalación. Fuente: Foroughi (2018)

4.1.2 Condiciones del combustible

Se utiliza propano en fase gas como fuente de combustible para generar un dardo de fuego. Según la revisión bibliográfica el 60% de los accidentes registrados son combustibles GLP y entre los combustibles más utilizados en estudios experimentales destaca el propano, permitiendo contrastar los datos obtenidos con datos reales.

La velocidad del gas en el agujero de salida debe ser sónica para obtener valores experimentales con una mayor aproximación a los valores reales.

4.1.3 Ubicación de la instalación experimental

La instalación de este proyecto se ubica en el laboratorio (Figura 4.2) del Centre d'Estudis del Riesc Tecnològic (CERTEC), situado en la Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

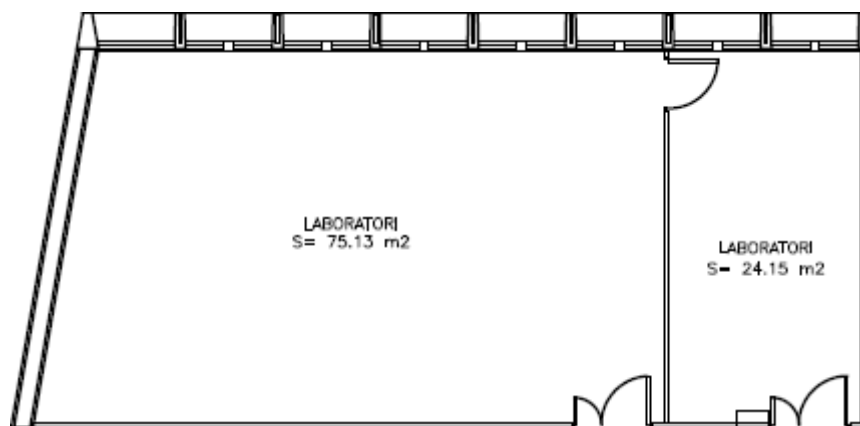


Figura 4.2. Plano del laboratorio del edificio I de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE). Proporcionado por la Universidad Politécnica de Cataluña

El laboratorio situado a la izquierda del plano es donde se ubica la instalación experimental. La sala posee una altura de 4 m, una anchura de 6,80 m y longitudes de 10,40 m (pared superior del plano) y 11,60 m (pared inferior del plano). Dispone de una instalación para el suministro de agua y aire comprimido.

El laboratorio situado a la derecha queda separado mediante una pared, la cual dispone de una ventana de observación, una puerta cortafuegos y un agujero habilitado para conexiones eléctricas de la sala contigua.

4.1.4 Longitud de llama

La longitud de llama del dardo de fuego en posición horizontal y vertical queda limitada por la distancia más pequeña del laboratorio, en este caso su altura. La longitud máxima del dardo de fuego (vertical) no puede poseer un valor superior o igual a 4 m.

Los modelos que describen la longitud de llama son aproximados, por ello se escoge una longitud máxima de 3 m dejando un margen a la distancia del «lift-off». La longitud mínima escogida es de 0,5 m para facilitar los ensayos donde se pruebe la instalación por primera vez.

4.1.5 Estructura y material de la instalación

Uno de los requisitos fundamentales en el diseño de la instalación es que sea económicamente rentable y segura. Este requisito puede ser cumplido escogiendo los componentes de la instalación en base a su relación precio, función y vida útil.

El material a utilizar en el transporte del combustible debe ser resistente a las condiciones de contorno (presión del combustible y temperatura del dardo de fuego) para su uso con gas propano y garantizar la seguridad de los usuarios.

La estructura diseñada debe ser móvil, permitiendo desplazar la instalación con facilidad a cualquier otra ubicación dentro del edificio o fuera de él (El grupo de investigación CERTEC ha realizado estudios para la protección contra incendios en zonas al aire libre) y mover la instalación a un lugar adecuado para su almacenamiento con tal de no dificultar otros estudios o dañar la propia instalación. Además, al formar parte de una instalación experimental para el análisis del efecto dominó, la movilidad añade al dardo de fuego diferentes ángulos de impacto.

Otra característica de la estructura es la necesidad de ser flexible tanto en su eje horizontal como su eje vertical. Es necesario poder variar la altura del agujero de salida para generar un dardo de fuego vertical con su máxima longitud y, por otro lado, la variación en la altura permite crear diferentes ángulos de impacto para un dardo de fuego horizontal. Por el contrario, poder variar la longitud de la instalación permite adaptarse a su ubicación, en este caso al laboratorio, y almacenarse de forma más eficiente ocupando un espacio menor.

4.1.6 Diseño seguro y sostenible

Otro de los requisitos más importante en el diseño de la instalación es la seguridad que esta debe proporcionar al operario y a su entorno. Al hacer uso de combustibles el material para su transporte debe ser resistente a golpes con tal de prevenir daños en la estructura (fugas, roturas, etc.) que puedan provocar un accidente mayor y poner en peligro la seguridad del edificio y sus operarios. Resulta oportuno añadir una sujeción a la fuente de combustible que la prevenga de caídas.

Cabe agregar que un diseño más seguro para su operario debe contemplar una distancia de seguridad ante la radiación térmica del dardo de fuego y un fácil uso de los componentes de seguridad y medición con tal de controlar de manera eficiente las características del dardo de fuego (presión antes del caudalímetro, presión a la salida y caudal utilizado). Esta última especificación debe ir acompañada de un manual de operación que detalle de forma eficiente y concisa las instrucciones de operación y seguridad.

La producción de gases contaminantes al generar un dardo de fuego es irremediable para poder entender los dardos de fuego, pero con tal de provocar un mínimo impacto ambiental se redacta un manual de operaciones para prevenir el uso erróneo de la instalación.

4.2 Diseño de detalle: Componentes, condiciones de trabajo y dimensionado de la instalación

El diseño de detalle de la instalación tiene como objetivo definir de los componentes necesarios, el dimensionado del diámetro de la tubería y el rango de trabajo (presión, temperatura, etc.) de los componentes de la instalación.

No se incluyen el dimensionado de la estructura de soporte o de los componentes de ensamblaje de la instalación. Para facilitar la lectura del apartado las condiciones y los resultados de cada cálculo se encuentran en el ANEXO A de este proyecto.

4.2.1 Esquema preliminar: Componentes de la instalación y condiciones de trabajo

Teniendo en cuenta los diseños experimentales expuestos en la revisión bibliográfica y las especificaciones del diseño conceptual, es necesario que la instalación disponga de elementos de medición, seguridad y control, una estructura móvil como soporte, la conducción y el recipiente de propano.

Estos elementos se detallan en la Tabla 4.1 en base a la función que deben realizar en la instalación, el motivo de su consideración y su ubicación. No se considera la estructura móvil, los diferentes complementos de la conducción de propano o el recipiente de propano

Tabla 4.1. Componentes necesarios para la instalación: Función, descripción y ubicación

Componente	Función	Descripción de su consideración	Ubicación
Válvula de regulación	Control	Válvula manual para controlar el flujo de propano y generar el dardo de fuego estipulado.	Situada cerca del recipiente de propano.
Electroválvula	Seguridad	Válvula controlada mediante electricidad para el cierre a distancia del flujo de propano en la instalación en caso de emergencia.	Situada cerca de la válvula reguladora.
Caudalímetro	Medición	Permite medir el caudal másico de forma indirecta mediante la medida del caudal volumétrico posibilitando un correcto ajuste en la válvula de regulación hasta la posición requerida y contrastar los resultados experimentales con los valores teóricos.	Situado cerca de la válvula manual.
Manómetro	Medición	Comúnmente utilizado para la medición de presión en recipientes cerrados. Conocer la medida de presión permite ajustar el regulador de presión de forma correcta para obtener el valor requerido y	Uno situado cerca del caudalímetro y otro cerca

conocer las condiciones de la conducción de propano en el recipiente de propano. recipiente y el caudalímetro: presión interna y densidad.

Regulador de presión	Control	Permite reducir la presión del propano con tal de modificar su estado hasta alcanzar la fase gas y su presión para generar los dardos de fuego con las características de salida requeridas.	Situado cerca del manómetro.
Transductor de presión	Medición	Permite medir la presión del propano cerca del orificio de salida y conocer las condiciones (presión y densidad) en ese punto para contrastar los valores experimentales pueden contrastarse con los valores teóricos.	Situado cerca del orificio de salida.
Tubo flexible	Estructural	Otorga flexibilidad a la conducción de propano pudiendo ajustar el ángulo del dardo de fuego y obtener una correcta adaptación en un espacio cerrado y en la instalación del estudio del efecto dominó.	Situado antes del orificio de salida.
Boquilla con rosca	Estructural	Facilidad para la modificación del diámetro de salida pudiendo generar dardos de fuego con diferente geometría de llama.	Situado en el orificio de salida.

La Figura 4.3 muestra un esquema preliminar de la instalación implementando los componentes expuestos anteriormente y su respectiva ubicación. Se incluye además el recipiente de propano, pero no su estructura de soporte.

El esquema preliminar constituye una primera aproximación al diseño final, pudiendo considerar las condiciones de cada punto de la instalación.

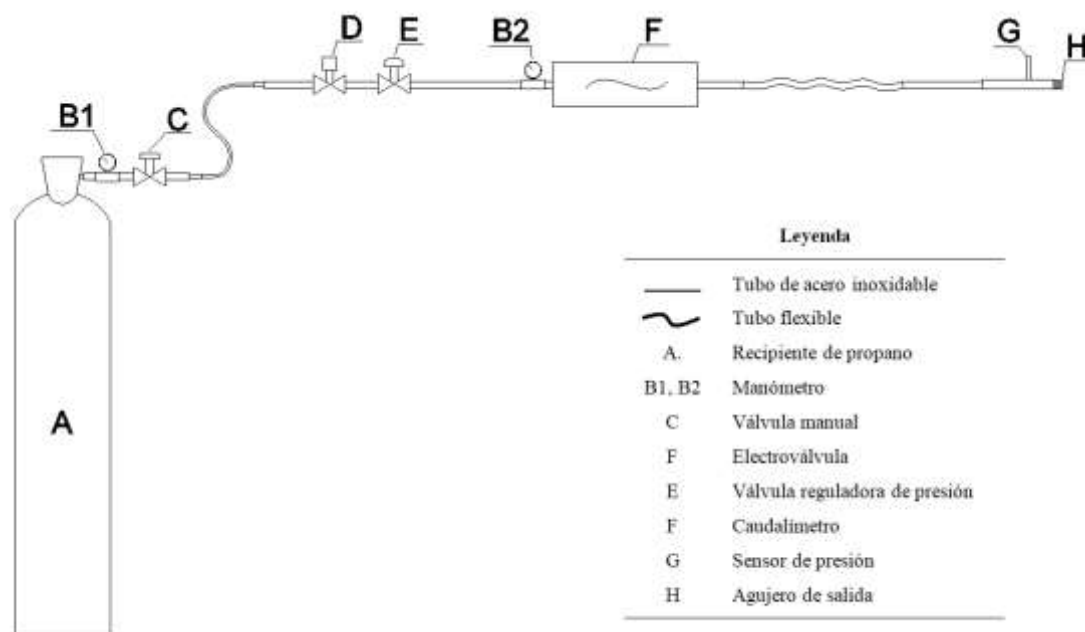


Figura 4.3. Diseño preliminar de la instalación

4.2.2 Dimensionado de la tubería: Cálculo del diámetro

El dimensionamiento del diámetro de la tubería debe hacerse en base del agujero de salida, el cual debe poder generar un dardo de fuego con su máxima y mínima longitud de llama. El diámetro de la tubería corresponde al diámetro que genere la máxima longitud de llama y aquellos que generen una longitud de llama en un rango entre 0,5 y 3 m serán los diámetros utilizados en boquillas como complementos a la tubería.

Se utiliza el modelo de Palacios y Casal (2011), el cual predice de forma aproximada la longitud de llama del dardo de fuego vertical según el diámetro de salida, el cual aborda la forma del dardo de fuego caracterizándola en base a una forma cilíndrica. Las ecuaciones expresan la longitud de llama definida por su longitud de llama radiada (L) y el diámetro equivalente (D_{eq}), el cual es obtenido definiendo un cilindro con un volumen igual a la isoterma de 800 K que rodea su superficie. Casal (2018a) añade la Ecuación (4.4) que define el «lift-off» (S) del dardo de fuego.

$$L = 7 \cdot D_{eq} \quad (4.1)$$

$$\frac{D_{eq}}{d_{or}} = 0,14 \cdot Re^{0,4} \quad (4.2)$$

$$\frac{L}{d_{or}} = Re^{0,4} \quad (4.3)$$

$$S = 6 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{0,5} \quad (4.4)$$

Donde d_{or} es el diámetro del orificio de salida (m) y Re es el número de Reynolds (–). Mediante las ecuaciones anteriores es posible calcular el diámetro requerido detallando las características del dardo de fuego según las especificaciones del diseño conceptual.

La Tabla 4.2 muestra los diámetros que permiten generar una longitud de dardo de fuego comprendida entre 0,5 y 3 m. Hay que tener en cuenta que la distancia que abarca el dardo de fuego es la suma de la longitud de llama y «lift-off»

Tabla 4.2. Diámetros óptimos para la instalación obtenidos mediante la geometría de llama

Diámetro del orificio (mm)	Longitud de llama (m)	Diámetro equivalente (m)	«Lift-off» (m)	Número de Reynolds ²
4	0,63	0,09	0,34	$3,26 \cdot 10^5$
5	0,86	0,12	0,38	$4,07 \cdot 10^5$
6	1,13	0,16	0,42	$4,89 \cdot 10^5$
7	1,40	0,20	0,45	$5,70 \cdot 10^5$
8	1,69	0,24	0,48	$6,52 \cdot 10^5$
9	2,00	0,28	0,51	$7,33 \cdot 10^5$
10	2,31	0,32	0,54	$8,14 \cdot 10^5$
11	2,64	0,37	0,57	$8,96 \cdot 10^5$
12,7 ¹	3,23	0,45	0,61	$1,03 \cdot 10^6$

¹ El diámetro de 12,7 mm equivale a ½". Diámetro nominal (DN) común en tuberías.

² Reynolds se ha calculado respecto el diámetro del orificio para propano a velocidad sónica (253 m/s) (Casal, 2018c) y densidad en condiciones de salida (25°C y 1,45 bar) (Foroughi, 2018).

Se escoge como diámetro nominal de la tubería el diámetro de 12,7 mm (½ pulgada) por su gran utilización en tuberías, dado que un DN no utilizado puede encarecer el coste de los componentes o la inexistencia de un componente para ese diámetro solicitado.

Los diámetros entre 4 y 11 mm cumplen con las especificaciones indicadas en la longitud de llama.

4.2.3 Condiciones de propano en la instalación

Para determinar el rango de trabajo de los componentes de medición es necesario determinar previamente las condiciones de caudal másico, presión y densidad del propano en cada sección de la instalación una vez se conoce el diámetro de la tubería de propano.

Cálculo del flujo másico

El flujo másico a través del orificio puede ser calculado mediante la siguiente ecuación (Casal, 2018c).

$$m = A_{or} \cdot C_D \cdot P_{in} \cdot \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right) \cdot \frac{M_w}{Z \cdot R \cdot T_{in} \cdot 10^3} \cdot \left[\left(\frac{P_{or}}{P_{in}} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{or}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (4.5)$$

Donde,

- m es el flujo másico (kg/s).
- A_{or} es el área del agujero de salida (m²).
- C_D es el coeficiente adimensional de descarga (-).
- P_{in} es la presión en el interior de la tubería (Pa).
- γ es el coeficiente de las capacidades caloríficas (c_p/c_v) del gas (-).
- M_w es el peso molecular del gas (kg/kmol).
- R es la constante universal de los gases (8.314 kJ/kmol·K).
- Z es el factor de compresibilidad a P_{in} y T_{in} .
- T_{in} es la temperatura dentro de la tubería (K).
- P_{or} es la presión en la salida del orificio (Pa).

Al simular una pérdida de contención en una tubería el coeficiente de descarga adquiere un valor de 0,62; donde el valor de 1 equivale a una ruptura catastrófica de la tubería (Casal, 2018c). Este modelo únicamente puede ser utilizado si se conocen las condiciones de presión y temperatura en el interior de la tubería y en el orificio de salida.

Estas condiciones pueden ser calculadas al considerar las ecuaciones para una velocidad crítica, es decir, la velocidad del sonido de un gas a una cierta presión y temperatura. Esta es la máxima velocidad que alcanza un gas al atravesar un agujero (Figura 4.4) (Casal, 2018c).

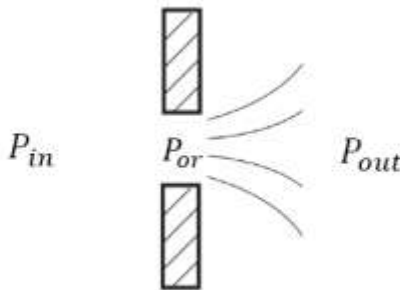


Figura 4.4. Ilustración del flujo de gas a través de un orificio. Fuente: (Casal, 2018c)

Al asumir una condición sónica en el dardo de fuego se debe cumplir la siguiente relación entre la presión en el interior de la tubería y la presión en el exterior:

$$\frac{P_{in}}{P_{out}} \geq \left[\frac{\gamma + 1}{2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4.6)$$

Donde P_{out} es la presión en el exterior y, en este caso, la atmosférica (Pa). Foroughi (2018) reporta un valor de 1,132 para la variable γ del propano, obteniendo de la Ecuación (4.6) una P_{in} de 2,5 bar cerca del orificio de salida.

Este valor de la presión interna de la tubería no contempla pérdidas de carga. Al no conocer la longitud de la tubería no es posible conocer la pérdida de carga, pero se considera que el trayecto entre el orificio y la válvula de regulación de presión no poseen una distancia lo suficientemente grande para provocar grandes pérdidas de presión. Por ello, se escoge un valor de 3 bar en vez de 2,5. Esta suposición no afecta al diseño de la instalación o la seguridad de los usuarios siempre y cuando se tenga en cuenta en el rango de trabajo de los elementos que la componen, ya que es posible ajustar la presión en la válvula reguladora de presión hasta obtener el valor requerido.

Al obtener la P_{in} es posible calcular la presión en el orificio de salida en condiciones de velocidad sónica teniendo en cuenta la relación entre la presión en el interior del tubo y la presión en el orificio de salida, la cual debe cumplir:

$$\frac{P_{or}}{P_{in}} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4.7)$$

Haciendo uso de la Ecuación (4.7), se obtiene una P_{or} igual a 1,73 bar. Simultáneamente, la temperatura en condiciones de velocidad sónica cumple la siguiente relación:

$$\frac{T_{or}}{T_{in}} = \left(\frac{P_{or}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \quad (4.8)$$

Donde T_{or} es la temperatura en el orificio de salida (K). Considerando esta temperatura igual a la temperatura ambiente se obtiene una temperatura en el interior de la tubería de 317,83 K.

Finalmente, tras aplicar la Ecuación (4.5) se obtienen los valores de la Tabla 4.3, donde se recoge cada caudal másico en función del diámetro del agujero de salida:

Tabla 4.3. Caudales máscicos a velocidad sónica para cada diámetro

Diámetro del orificio (mm)	Caudal máscico (kg/s)
4	$6,20 \cdot 10^{-3}$
5	$9,68 \cdot 10^{-3}$
6	$1,39 \cdot 10^{-2}$
7	$1,90 \cdot 10^{-2}$
8	$2,48 \cdot 10^{-2}$
9	$3,14 \cdot 10^{-2}$
10	$3,87 \cdot 10^{-2}$
11	$4,69 \cdot 10^{-2}$
12,7	$6,25 \cdot 10^{-2}$

Condiciones de presión y densidad

El caudal máscico es un valor constante en toda la instalación, pero no sus condiciones de presión o densidad que varían en diferentes puntos de la tubería a causa de la reducción o pérdida de presión. La temperatura, por el contrario, se considera constante en el sistema.

La Tabla 4.4 reúne las condiciones de presión y densidad en cada punto de la instalación haciendo uso de la simbología utilizada en la Figura 4.3 para facilitar su comprensión. La instalación se divide en tres secciones: trayecto entre el recipiente de propano hasta el regulador de presión, trayecto entre el regulador de presión hasta el caudalímetro y trayecto entre el caudalímetro hasta el orificio de salida.

Según Gómez-Mares (2009) y Palacios Rosas (2011) la presión de un recipiente de propano posee un valor de 9,5 bar. Se considera que el valor ajustado por el regulador de presión es la presión interna de la tubería, siendo pues de 3 bar. Como se ha calculado anteriormente, cerca del orificio de salida la presión asciende hasta 2,5 bar y alcanza 1,73 bar en el orificio de salida.

Tabla 4.4. Condiciones de presión y densidad del propano a lo largo de la instalación.

Leyenda	Ubicación	Presión (bar)	Densidad (kg/m ³) *
A	Interior del recipiente de propano	9,5	20,55
B y C	Salida del recipiente	~ 9,5	20,55
D	Electroválvula	~ 9,5	20,55
F	Regulador de presión a caudalímetro	3	5,623
E → F	Trayecto regulador de presión a caudalímetro	~ 3	5,623
F	Caudalímetro	~ 3	5,623
F → G	Trayecto caudalímetro a orificio de salida	~ 2,5	5,24
G	Orificio de salida	1,73	2,643

* Condiciones de temperatura constante a 25 °C. Valores obtenidos de Foroughi (2018).

Cálculo del flujo volumétrico

La variación de las condiciones de presión y densidad en la instalación provoca que el caudal volumétrico varíe. La Tabla 4.5 muestra el rango de valores del caudal volumétrico para cada sección de la instalación (trayecto entre el recipiente de propano hasta el regulador de presión, trayecto entre el regulador de presión hasta el caudalímetro y trayecto entre el caudalímetro hasta el orificio de salida) en función del máximo y mínimo caudal másico calculado y sus respectivas condiciones de presión y densidad.

Tabla 4.5. Variación del flujo volumétrico en la instalación con las posibles opciones de salida.

Ubicación	Diámetro (mm)	Flujo másico (kg/s)	Presión (bar)	Densidad (kg/m ³)	Flujo volumétrico (L/min)
Salida del recipiente	12,7	$6,25 \cdot 10^{-3}$	9,5	20,55	18,09
Salida del recipiente	12,7	$6,20 \cdot 10^{-2}$	9,5	20,55	182,36
Orificio de salida	4	$6,20 \cdot 10^{-3}$	1,73	2,643	141,73
Orificio de salida	5	$9,68 \cdot 10^{-3}$	1,73	2,643	221,45
Orificio de salida	6	$1,39 \cdot 10^{-2}$	1,73	2,643	318,89
Orificio de salida	7	$1,90 \cdot 10^{-2}$	1,73	2,643	434,04

Orificio de salida	8	$2,48 \cdot 10^{-2}$	1,73	2,643	566,91
Orificio de salida	9	$3,14 \cdot 10^{-2}$	1,73	2,643	717,49
Orificio de salida	10	$3,87 \cdot 10^{-2}$	1,73	2,643	885,79
Orificio de salida	11	$4,69 \cdot 10^{-2}$	1,73	2,643	1071,81
Caudalímetro	12,7	$6,25 \cdot 10^{-3}$	3	2,643	66,11
Caudalímetro	12,7	$6,25 \cdot 10^{-2}$	3	2,643	666,45

4.2.4 Rango de trabajo y características de los componentes de la instalación

En este apartado se detallan las características y el rango de trabajo de la instalación para la correcta selección de componentes.

En primer lugar se expone en la Tabla 4.5 las dimensiones que debe poseer el recipiente de propano a utilizar. El criterio escogido se basa en las dimensiones de la puerta del laboratorio y de la escalera del edificio, ya que debe poder acceder fácilmente al laboratorio.

Tabla 4.6. Dimensiones límite del recipiente de propano

	Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)
Recipiente de propano	0 – 2	0 – 1,2	0 – 2

A continuación, el dimensionado de la tubería en la Tabla 4.7 para el transporte de propano donde se recopila las dimensiones

Tabla 4.7. Dimensionado de la tubería para el transporte de propano

	Diámetro (mm)	Longitud (m)
Tubería	12,7	1,5 – 2
Tubo flexible	12,7	0,5
Boquilla (Orificio de salida)	4 – 11	-

Finalmente, la Tabla 4.8, donde se especifica el rango de trabajo (caudal volumétrico y presión) de cada componente, recopilando los datos obtenidos en los apartados anteriores.

Tabla 4.8. Rango de trabajo de los componentes

Componente	Presión (bar)	Caudal volumétrico (L/min) / (NL/min)
Válvula de regulación	9,5	-
Electroválvula	9,5	-
Manómetro	3 – 9,5	-
Regulador de presión	3	66,11 – 666,45 / 192 – 1940
Caudalímetro	3	66,11 – 666,45 / 192 – 1940
Conducción de propano	1,73 – 9,5	-
Sensor de presión	1,73 – 3	141,73 – 666,45 / 238 – 1940
Recipiente de propano	1,73 – 3	141,73 – 666,45 / 238 – 1940

4.3 Diseño definitivo: Solución implementada

Este apartado concluye con el desarrollo del diseño de la instalación para generar un dardo de fuego acorde con el diseño conceptual y el diseño de detalle expuestos en los apartados anteriores.

En un primer lugar se detalla la elección de los componentes que constituyen la instalación y, finalmente, se muestra el diseño llevado a cabo.

4.3.1 Selección de componentes: Especificaciones técnicas

La gran mayoría de componentes han sido seleccionados de la compañía Swagelok Ibérica por ser una empresa internacional especializada en la venta de componentes de sistemas de fluidos.

Otro motivo en la selección de esta empresa es su amplia gama de productos certificados que cumple con las características deseadas para el diseño, permitiendo así que la gran parte de componentes provengan de una única empresa. Esto facilita la adaptabilidad entre los elementos y su consulta en caso de problema.

Para facilitar la lectura del apartado, las fichas técnicas de cada componente se encuentran en el ANEXO B de este proyecto.

Material para el transporte de propano y estructura de la instalación

El material seleccionado para el transporte de fluidos, propano en este caso, es acero inoxidable 316 sin soldadura y aluminio para la estructura de la instalación debido a sus propiedades. En la Tabla 4.9 se comparan el cobre, aluminio y acero inoxidable.

El acero inoxidable posee la mayor resistencia mecánica, siendo por lo tanto más resistente que el cobre o el aluminio, y la menor conductividad térmica. La resistencia mecánica del acero permite que la instalación sufra un menor daño a cualquier golpe que pueda dañar la tubería. Además, su baja conductividad térmica permite una mayor resistencia térmica de la conducción de propano frente al cobre o aluminio.

Tabla 4.9. Comparación entre distintos materiales para la conducción de propano

Material	Densidad (kg/cm ³) ¹	Punto de fusión (°C)	Resistencia a la tracción (MPa)	Coefficiente de expansión térmica (x10 ⁻⁶ K ⁻¹) ²	Conductividad térmica (W/m·K) ³
Cobre	8,96	1083	314	17	401
Aluminio	2,70	660,4	130 – 195	2	237
Acero inoxidable 316	7,96	1370 – 1400	460 – 860	16 – 18	16,3

¹ Condiciones de temperatura a 20 °C.

² Condiciones de temperatura entre 0 – 100 °C para cobre y aluminio y 20 – 100 °C para el acero inoxidable 316.

³ Condiciones de temperatura entre 0 – 100 °C para el cobre, y 23 °C para el acero inoxidable 316.

Fuente: <http://www.goodfellow.com/sp/>

Por otro lado, el aluminio es comúnmente utilizado para perfilierías a causa de su ductilidad y posee un coste menor que acero inoxidable y el cobre. Esto hace que una estructura de aluminio sea más económica. Al poseer una conductividad térmica más baja que el cobre permite que la estructura posea una mayor resistencia térmica frente a una estructura de cobre.

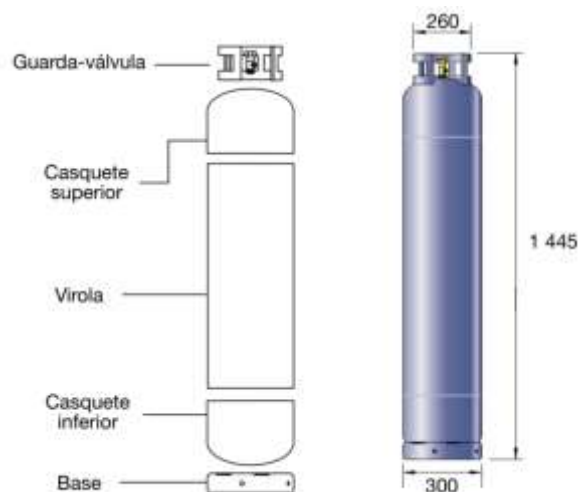
Botella industrial de propano

El recipiente de propano escogido es una botella industrial de 35 kg de la marca Repsol. La Figura 4.5 muestra el diseño del recipiente junto a sus dimensiones y partes de la misma.

La composición de la sustancia almacenada es de >99% propano y el resto hidrocarburos C3-C5, principalmente butano.

En primer lugar, se selecciona una bombona industrial de 35 kg al poseer la mayor capacidad de combustible almacenado dentro de su categoría de recipiente móvil a presión. Este tipo de recipiente es ideal para espacios cerrados, facilitando su transporte hasta y dentro de la zona experimental.

Un depósito de propano debería situarse fuera del edificio principalmente por seguridad y, en base a las dimensiones del edificio, tampoco podría ser llevado a la planta donde se ubica el laboratorio.



*Figura 4.5. Imagen del diseño de una botella de propano (35 kg) y sus dimensiones (unidades en milímetros).
Fuente: Cepsa (2001)*

Para garantizar la seguridad del almacenamiento de la botella industrial de propano, se hace un análisis del riesgo de almacenamiento en el ANEXO C.

Válvula de aguja

La válvula manual seleccionada para la obertura y el cierre de la instalación es una válvula de aguja (Figura 4.6). Una de las variables importantes en el diseño de la instalación es el caudal másico y volumétrico, ambos relacionados en función de la densidad del sistema. Para realizar un correcto análisis de los datos obtenidos es crucial que las condiciones iniciales en cada ensayo sean lo más semejantes entre ellas, por ello es necesaria una apertura con gran precisión.



Figura 4.6. *Válvula de aguja de ½" SWG*

A diferencia de los vástagos de las demás válvulas (bola, diafragma, etc.), la válvula de aguja posee un vástago cónico. Esto permite un desplazamiento vertical lento, requiriendo múltiples vueltas para abrir la sección de paso del fluido, y en consecuencia un control del caudal con gran precisión.

A continuación se adjunta la Tabla 4.10, donde se detallan los datos técnicos de la válvula escogida.

Tabla 4.10. *Información técnica de la válvula de aguja*

Datos técnicos	
Marca	Swagelok
Modelo	Aguja con bonete de unión para servicio crítico (Serie N)
Referencia	SS-12NBS8
Material del cuerpo	Acero Inoxidable 316
Material de la válvula	Acero inoxidable
Material del obturador	Aleación con base de cobalto
Tipo de mando	Barra de aluminio de color negro
Tamaño de conexión	½ pulgada
Tipo de conexión	Racor Swagelok®

Orificio	0,437 pulgadas
Lubricante	Nickel Never Seez
Modelo de caudal	Modelo recto (2 vías)
Máxima temperatura según rango de presión	232 °C @ 284 bar
Rango de presión a temperatura ambiente	413 bar @ 37 °C
Coefficiente de caudal	2,1

Fuente: <https://www.swagelok.com/es-ES/catalog/Product/Detail?part=SS-12NBS8>

Electroválvula

La electroválvula seleccionada para el cierre de la instalación en caso de emergencia es una válvula de membrana de 2/2 vías con servo control (Figura 4.7) de la empresa Bürkert. Al contrario que la válvula de aguja se utiliza una válvula de membrana debido a que el objetivo principal es el cierre de la conducción de propano.



Figura 4.7. Electroválvula normalmente cerrada de ½"

Se selecciona del tipo 2/2 vías con tal de dejar pasar el fluido en una única dirección. El control de la válvula mediante presión neumática es descartado a causa de la ubicación de la instalación de aire a presión en el laboratorio. La fuente de electricidad y el operario que la controle quedan protegidos detrás de la pared del laboratorio, permitiendo una mayor seguridad.

Para garantizar la seguridad de los usuarios y la instalación el estado de la válvula es normalmente cerrado, siendo la posición de cierre más segura para la instalación sin suministro de electricidad. Al conectar la válvula a la fuente de tensión, tal y como indican su manual de usuario, la válvula queda abierta y permite el paso del combustible.

En caso de un fallo de la instalación o un caso de emergencia, donde un fallo de la instalación puede ser considerado como un fallo de la fuente de tensión, el operario únicamente debe pulsar el botón de apagado de la fuente de alimentación para cerrar la válvula. En el supuesto caso de que fallase la fuente de tensión la válvula se cerraría automáticamente, si la válvula fuese normalmente abierta al fallar la fuente de tensión no podría cerrarse la válvula en un caso de emergencia.

La Tabla 4.11, adjuntada a continuación, detalla los datos técnicos de la válvula escogida.

Tabla 4.11. Información técnica de la electroválvula

Datos técnicos	
Marca	Bürkert
Modelo	6281EV
Referencia	221 844
Función	Normalmente cerrada
Orificio	DN 13 mm
Material del cuerpo	Latón según DIN EN 50930-6
Material de juntas	NBR
Conexión NBR	G 1/2
Temperatura ambiente	Máximo hasta 55 °C
Temperatura del medio	-10 a 80 °C
Caudal de trabajo	3,8 m ³ /h
Presión de trabajo	0,2 – 16 bar
Tensión de alimentación	24 V CC

Consumo de potencia	8 W
Clase de protección	IP65 con conector y conexión de cable
Tiempo de respuesta	0,1 – 4 s (en función de la presión diferencial)
Clase de aislamiento de la bobina	Poliamida clase B
Peso	0,532 kg

Fuente: <https://www.burkert.es/es/type/6281>

Fuente de alimentación lineal

Se escoge una fuente de alimentación fija (Figura 4.8) para mantener en funcionamiento la electroválvula seleccionada. En base a la tensión y potencia requerida de la electroválvula se escoge una fuente de 24 V y 3 A.



Figura 4.8. Fuente de alimentación fija de 24 V y 3 A. Fuente: https://diotronic.com/alim-fija-24v-3a_15173/

El motivo de generar una tensión lineal es mantener constante el voltaje de alimentación de la electroválvula, asegurando que no exista forma de que un operario se equivoque en la puesta en marcha de la instalación. El diseño escogido frente a otras fuentes de alimentación, como por ejemplo para raíl DIN, es debido a su simplicidad, comodidad y uso intuitivo para el operario.

La Tabla 4.12, adjuntada a continuación, detalla los datos técnicos de la fuente de alimentación.

Tabla 4.12. Información técnica de la fuente de alimentación lineal

Datos técnicos	
Marca	Diotronic S.A
Modelo	Fuente fija
Referencia	PS2403

Tensión de salida fija	24 V
Corriente de salida	3 A
Dimensiones	175 x 125 x 70 mm
Peso	2,6 kg

Fuente: https://diotronic.com/alim-fija-24v-3a_15173/

Válvula reguladora de presión

La válvula reguladora de presión seleccionada es de alta sensibilidad con muelle (Figura 4.9). Este componente ha sido seleccionado en base a los requisitos de la instalación (presión de servicio, caudal de flujo y temperatura ambiente) que más se adecúan al proyecto.



Figura 4.9. Válvula reguladora de presión

A continuación se adjunta la Tabla 4.13, donde se detallan los datos técnicos de la válvula escogida.

Tabla 4.13. Información técnica del regulador de presión

Datos técnicos	
Marca	Swagelok
Modelo	Alta sensibilidad con muelle (Serie LPRS4)
Referencia	LPRSN4-02-3-VVV

Tipo de sensor	Diafragma
Material del cuerpo	Acero inoxidable 316L (SS316)
Conexión de entrada y salida	NPT hembra. ½ pulgadas / D N15 mm
Conexión de manómetro	¼ pulgadas NPT
Tamaño del asiento	10 mm
Material de cierre	FKM fluorocarbono
Material del diafragma	FKM fluorocarbono
Material del cierre del asiento	FKM fluorocarbono
Presión de servicio	16 bar
Presión de ajuste	2 bar
Rango de control de presión	0,3 a 3 bar
Rango de temperatura	-15 a 80 °C
Máximo caudal	130 Nm ³ /h
Coefficiente de caudal	1,84
Peso	6,5 kg

Fuente: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/ES/MS-02-430.pdf>

Manómetro

Finalmente se escoge un único manómetro (Figura 4.10, manómetro B2), siendo descartado el manómetro situado al principio de la instalación (B1 según la leyenda). Disponer de dos manómetros no es necesario al no existir una gran separación entre ellos, ya que la caída de presión no es suficientemente grande.



Figura 4.10. Manómetro para medida de presión de 0 a 6 bar

Por consiguiente, se da prioridad a conocer la presión justo en el regulador de presión con tal de ajustar la válvula reguladora de presión con precisión. En base al diseño de detalle es necesario una presión de 3 bar, por lo que se escoge un manómetro con medición de hasta 6 bar. Es importante que la presión de trabajo no sea la misma que el límite de medición del manómetro para una buena lectura de presión.

Los datos técnicos se especifican en la Tabla 4.14, mostrada a continuación.

Tabla 4.14. Información técnica del manómetro

Datos técnicos	
Marca	Swagelok
Modelo	B
Referencia	PGI-63B-BG6-LAQX
Material del cuerpo	Acero inoxidable 316 (316 SS)
Diámetro de la esfera	63 mm
Conexión	Adaptador a tubo Swagelok de ¼ pulgada.
Precisión	± 1,5 % de valor final de escala (EN 837-1 clase 1,6)
Rango de presión	0 a 6 bar
Temperatura ambiente	-40 a 60 °C

Temperatura media

Máximo 200 °C

Fuente: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/es/MS-02-170.pdf>

Caudalímetro

El caudalímetro seleccionado es un rotámetro programado para la medida de gas propano (Figura 4.11). El modelo escogido puede ser reprogramado para medir diferentes gases, pudiendo ser modificado y adaptado a un futuro estudio con distinto combustible.



Figura 4.11. Rotámetro

En base al diseño de detalle se escoge un rango de 200 a 2.000 NL/min, abarcando el mayor uso de diámetros de salida según los cálculos realizados (5 a 11 mm). El diámetro de 4 mm es descartado al quedar fuera del rango de medición.

El estudio realizado por Gómez Mares (2010) y Palacios (2011) permite descartar el caudalímetro ultrasónico a causa de las complicaciones en la medida del caudal por la densidad del propano.

Los datos técnicos del modelo se encuentran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Información técnica del rotámetro

Datos técnicos	
Marca	Swagelok
Modelo	Medidor de caudal de área variable
Referencia	VAF-M4-2-1-05L-0
Tamaño del tubo de medición	1 pulgada
Conexión de entrada y salida	¾ pulgadas NPT
Rango de caudal	200 a 2000 NL/min
Temperatura de proceso	- 40 a 300 °C
Temperatura ambiente	-40 a 120 °C
Máxima presión de entrada	96 bar @ 20 °C
Directiva de Equipos a Presión	PED/G1/II/H
Presión de diseño (PS)	70 bar
Temperatura de diseño (TS)	300 °C
Presión máxima de prueba (PTmax)	136 bar
Clase de protección	IP66/68
Calibración	Medición de propano mediante factor de conversión
Peso	5 kg

Fuente: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/ES/MS-02-346.pdf>

Sensor de presión

El sensor de presión seleccionado es un transductor de presión antideflagrante (Figura 4.12). La condición antideflagrante es necesaria con tal de asegurar que el componente se mantenga seguro cuando se generen dardos de fuego en vertical.

Como referencia se utilizaron las características del sensor en la instalación experimental de Palacios (2011), donde el rango de presión es de 0 a 10 bar. Pese a que la presión de salida

calculada es inferior, el transductor puede ser utilizado para futuras instalaciones o ensayos que puedan requerir una presión mayor.



Figura 4.12. Transductor de presión para medida de presión de 0 a 10 bar

La Tabla 4.16 detalla los datos técnicos del componente.

Tabla 4.16. Información técnica del sensor de presión

Datos técnicos	
Marca	Swagelok
Modelo	E (Antideflagrante)
Referencia	PTI-E-AG10-19AR
Material del cuerpo	Acero inoxidable 316
Rango de presión	0 a 10 bar
Presión de exceso	35 bar
Presión de rotura	42 bar
Señal de salida	4 a 20 mA
Conector eléctrico	Conexión de ½ pulgada NPT macho con cable protegido de 1,8 m (IP67/NEMA 4X)
Conexión a proceso	Diafragma interno. ½ pulgada de adaptador a tubo Swagelok

Tensión de alimentación	10 a 30 V CC
Temperatura de fluido	-30 a 100 °C
Temperatura entorno	-30 a 100 °C
Temperatura almacenamiento	-40 a 105 °C
Rango compensado de temperatura	0 a 80 °C

Fuente: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/es/MS-02-225.pdf>

Tubo flexible

El tubo flexible escogido es una manguera de nilón (Figura 4.13). Se escoge la serie 7R al ser de servicio general y poseer las condiciones de servicio (temperatura y presión) que más se adaptan a las especificaciones estipuladas.



Figura 4.13. Manguera de nilón con malla de fibra como refuerzo de 1,5 m

La Tabla 4.17 muestra información técnica acerca del componente:

Tabla 4.17. Información técnica del tubo flexible

Datos técnicos	
Marca	Swagelok
Modelo	Manguera de nilón (Serie 7R)
Referencia	SS-7R-8-TP8-TA8-150 cm
Material de cubierta	Poliuretano negro perforado y refuerzo con malla de fibra (Resistente a la abrasión)
Material del cuerpo	Ánima lisa de nilón
Longitud	150 cm
Diámetro nominal	12,7 mm (1/2 pulgada)
Diámetro exterior	20,8 mm (0,82 pulgadas)
Diámetro interior	12,7 mm (1/2 pulgada)
Conexiones	12,7 mm (1/2 pulgada). Acero inoxidable 316
Radio mínimo al interior de la curva	7,62 cm (3 pulgadas)
Temperatura de servicio	-40 a 93 °C
Presión de servicio a 20 °C	137 bar
Presión mínima de rotura a 20 °C	551 bar
Peso de la manguera	0,21 kg/m

Fuente: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/es/MS-01-180.PDF>

4.3.2 Diseño final y ensamblaje de la instalación

La construcción de la instalación (Figura 4.14) es llevada a cabo por la compañía Swagelok Ibérica. La instalación ha sido presurizada con nitrógeno a 10 bar para la detección de fugas por parte de los técnicos especializados de Swagelok Ibérica antes de ser transportada al edificio I.

Para facilitar la lectura del apartado, los planos de la instalación se encuentran en el ANEXO B.



Figura 4.14. Instalación experimental para la generación de dardos de fuego

Finalmente, los elementos de control (válvula de aguja y válvula reguladora de presión), la seguridad (electroválvula) y la medición de la instalación (manómetro y caudalímetro) se disponen en un panel de regulación, facilitando a un operario el control de la instalación con tal de generar el dardo de fuego requerido.

Para facilitar la explicación de la estructura desarrollada se presenta en primer lugar la estructura principal, o soporte del panel de regulación, y finalmente el soporte para generar dardos de fuego.

Soporte del panel de regulación

El soporte del panel de regulación es una estructura simple de aluminio con forma rectangular (Figura 4.15), proporcionado estabilidad a la instalación. Los vértices inferiores del soporte poseen una rueda con vástago cada uno, aportando movilidad a la instalación, pero dos de las ruedas contienen un pasador de freno con goma. El pasador de freno permite que la instalación no se mueva mientras se genera un dardo de fuego.

La estructura dispone de una única abertura para colocar la bombona de propano junto a un cinturón de fijación en cada extremo. El cinturón cumple la función de adaptar la bombona de propano al soporte con tal de que quede bien ajustada y evitar que se desplace mientras se mueve la instalación a otro lugar.



Figura 4.15. Soporte del panel de regulación y conexión para el suministro de propano

El panel de regulación posee conectado un tubo flexible, ubicado en la parte posterior del panel, facilitando la conexión con la botella de propano. El tubo flexible contiene una conexión de rosca para facilitar la incorporación de un adaptador (Figura 4.16) para el suministro de propano. Este adaptador puede cambiarse por una conexión múltiple para más botellas industriales en caso de requerir ensayos con una larga duración.



Figura 4.16. Adaptador CG1017 para la botella Repsol de propano

Soporte para generar dardos de fuego

El soporte para generar dardos de fuego es una estructura simple de aluminio con forma de L (Figura 4.17), adherida al soporte del panel de regulación mediante una placa que permite su

sujeción mediante un tornillo y una rosca riel. Este mecanismo facilita el desplazamiento horizontal del soporte para generar dardos de fuego.

El vértice inferior del soporte posee una rueda con vástago y un pasador de freno con goma, permitiendo movilidad y estabilidad como el soporte del panel de control.

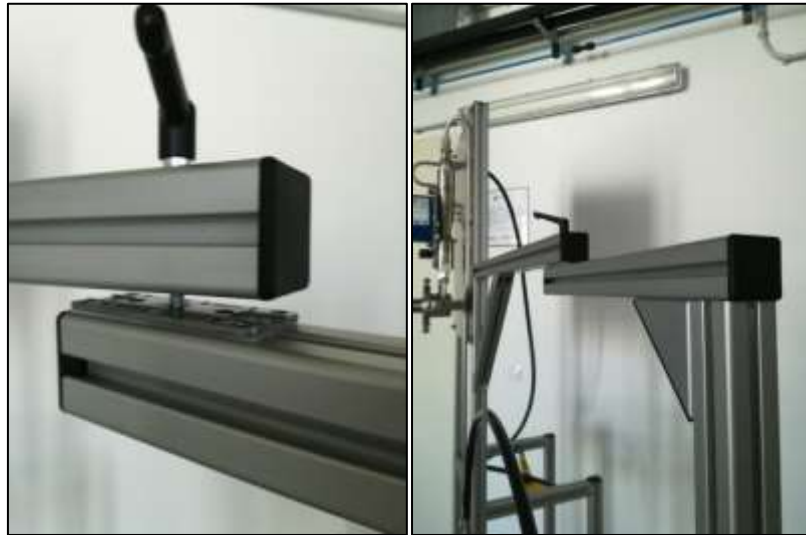


Figura 4.17. Estructura con riel para el desplazamiento horizontal de la sección final

La sección final de la instalación (Figura 4.18) se adhiere al soporte mediante un mecanismo similar, donde una placa facilita la sujeción mediante dos tornillos y dos roscas riel. Esto facilita el movimiento vertical de la sección a través del soporte.



Figura 4.18. Sección final de la instalación. Boquilla con rosca de 6 mm

Finalmente, para este proyecto se utilizan las boquillas (Figura 4.19), o reductores de diámetro, con un diámetro de salida de 6, 8 y 10 mm. Cualquier otro diámetro seleccionado dentro del rango de 5 a 11 mm es válido en base al rango de trabajo del caudalímetro.



Figura 4.19. Boquillas con rosca de diámetro 10 mm (izquierda) y 8 mm (derecha)

La sección final está destinada a la generación de dardos de fuego horizontales, dejando para un futuro la adaptación de las boquillas para generar dardos de fuego en vertical.

5 MANUAL DE OPERACIONES DE LA INSTALACIÓN

Lea por completo las instrucciones de operación y seguridad antes de manipular el conjunto. Cualquier operación de mantenimiento necesaria sobre el sistema ha de hacerse una vez que el conjunto esté despresurizado para evitar accidentes.

5.1 Esquema de la instalación

La Figura 5.1 muestra un esquema de la instalación, señalando los puntos de interés, para facilitar la comprensión de las instrucciones.

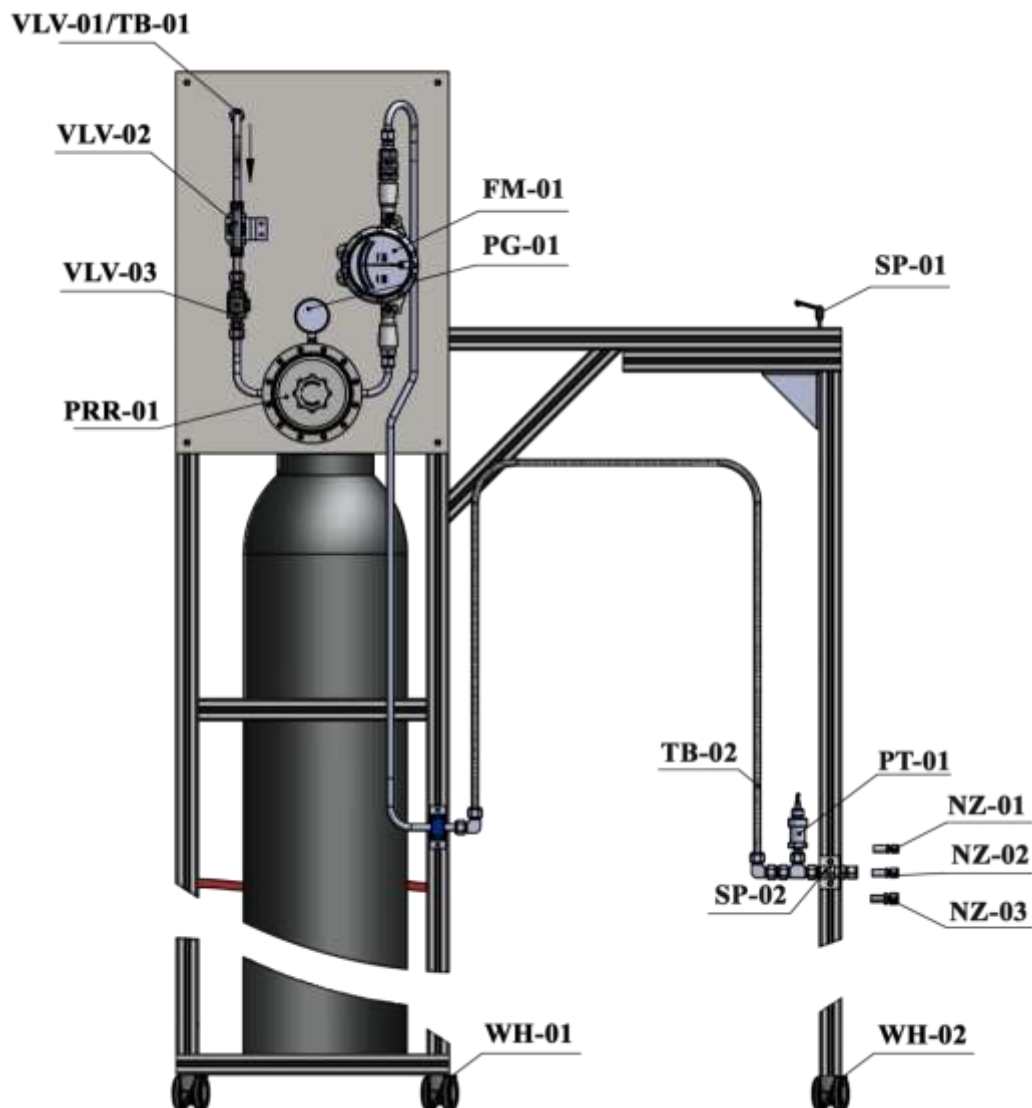


Figura 5.1. Esquema de los puntos de interés de la instalación

A continuación, se adjunta la Tabla 5.1 con tal de facilitar la comprensión de la simbología utilizada en el esquema.

Tabla 5.1. Leyenda del esquema de la instalación

REF	ÍTEM	REF	ÍTEM
TB-01	Tubo flexible	SP-02	Pasador vertical
VLV-01	Válvula manual	TB-02	Tubo flexible
VLV-02	Válvula de aguja	PT-01	Sensor de presión
VLV-03	Electroválvula	NZ-01	Diámetro de 6 mm
PRR-01	Regulador reductor de presión	NZ-02	Diámetro de 8 mm
PG-01	Manómetro	NZ-03	Diámetro de 10 mm
FM-01	Caudalímetro	WH-01	Rueda con pasador y freno
SP-01	Pasador horizontal	WH-02	Rueda con pasador y freno

5.2 Instrucciones de operación

- Coloque la bombona en el soporte (detrás del panel de operaciones) y abroche el cinturón de fijación. **Asegúrese que la bombona está bien ajustada y no se mueve.**
- Modifique manualmente la estructura si procede:
 - Para el desplazamiento de toda la estructura levante el bloqueo de las ruedas WH-01 y WH-02.
 - Para el desplazamiento horizontal desbloquee la rueda WH-02 y posteriormente gire el elemento SP-01 en sentido anti horario. Cuando pueda mover la estructura desplácela y sitúela donde se requiera. **Vuelva a bloquear la rueda WH-02.**
 - Para el desplazamiento vertical debe desenroscar los tornillos del soporte SP-02. Una vez ajustada la altura de la boquilla vuelva a enroscar los tornillos.
- Acople la válvula VLV-01 conectada al TB-01 en la boquilla de la bombona. Gire ligeramente la válvula VLV-02 en sentido anti horario para abrir el paso en la instalación.
- Encienda la fuente de tensión para abrir la válvula VLV-03.
- Gire la válvula VLV-01 en sentido anti horario para dar paso al combustible en la instalación. Ajuste la válvula VLV-02 mientras comprueba el caudal mediante el caudalímetro (FM-01) hasta alcanzar valor deseado.

6. Gire la válvula PRR-01 en sentido anti horario para disminuir la presión del fluido y compruebe el valor de presión en el PG-01 hasta alcanzar el valor deseado.
7. Encienda el combustible mediante el uso de una fuente de ignición de largo mango.
8. Al finalizar el ensayo cierre el suministro de combustible **girando la válvula VLV-01** en sentido horario. A continuación, apague la fuente de alimentación para cerrar la válvula VLV-03, gire en sentido horario la válvula VLV-02 hasta llegar a cerrar y finalmente gire en sentido horario la válvula PRR-01
9. Repita la instrucción 2 si procede. Desabroche el cinturón de fijación y **ubique la bombona con cuidado en su sitio establecido.**

5.3 Condiciones de trabajo

Las condiciones de trabajo de la instalación se exponen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Datos técnicos de la instalación experimental para generar dardos de fuego

Información técnica de la instalación	
Diámetro de la tubería	12,7 mm (½ pulgada)
Espesor de la tubería	0,049 pulgadas
Material de la tubería	Acero inoxidable 316 sin soldadura
Material del panel de regulación	Acero inoxidable satinado con espesor de 3 mm
Material del panel de la estructura	Aluminio
Rango de caudal volumétrico	200 – 2000 NL/min (Limitado por FM-01)
Temperatura máxima de proceso admitida	93 °C (Limitado por la manguera TB-02)
Temperatura máxima de ambiente admitida	60 °C (Limitado por el PG-01)
Presión máxima inicial admitida antes de PRR-01	16 bar (Limitado por PRR-01)
Presión máxima final admitida después de PRR-01	3 bar (Limitado por PRR-01)

5.4 Instrucciones de seguridad

Este conjunto ha sido fabricado en condiciones de alta calidad y fiabilidad siendo inherentemente segura, siempre y cuando se sigan las instrucciones de seguridad.

1. Manténgase alejado del dardo de fuego generado.
2. Manipular el conjunto fuera de propósito para el que ha sido construido puede provocar daños en el mismo y causar riesgo para el personal que lo manipula.
3. Cualquier operación de mantenimiento necesaria sobre el sistema ha de hacerse una vez que el conjunto este despresurizado con tal de evitar accidentes.
4. Utilice la válvula de aguja para cerrar el sistema. **No se aconseja el uso del regulador de presión como elemento de cierre.**
5. Comprobar que no se exceden las condiciones límites de trabajo expuestas en el apartado anterior mediante los sistemas de medición. Estas condiciones están indicadas en el panel de regulación.
6. Asegúrese que las ruedas de la instalación están bloqueadas antes de utilizar la instalación.

Para facilitar la lectura de este proyecto se juntan las instrucciones de instalación de los diferentes componentes. Se aconseja su descarga e impresión.

7. Instrucciones de montaje de los racores y boquillas (páginas 62 – 68).

Fuente: <https://www.swagelok.com/downloads/WebCatalogs/ES/MS-01-140.pdf>

8. Manual de usuario del transductor de presión.

Fuente: <https://www.swagelok.com/downloads/webcatalogs/en/MS-CRD-PTI-E.pdf>

9. Manual de operación de la electroválvula.

Fuente: <https://www.burkert.com/en/Media/plm/MAN/MA/MA6213-Manual-EU-EN.pdf?id=MAN00000000000000001000307592ENH>

5.5 Recomendaciones de seguridad

La radiación de un dardo de fuego decrece en gran medida con la distancia, por ello no existe un mayor peligro hasta que la distancia es mínima. Para aumentar la vida útil de la sección final de la instalación se recomienda envolver con un aislante térmico (como por ejemplo lana de roca) el soporte que sostiene los NZ-01/02/03 y el componente PT-01, asegurando por completo la protección ante la radiación del dardo de fuego.

6 ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL

Este apartado detalla la evaluación ambiental del proyecto en base a la Ley 21/2013 (BOE, 2013) al poder tener efectos significativos sobre el medio ambiente causados por la combustión de propano para generar dardos de fuego.

6.1 Descripción general del proyecto

El proyecto tiene como objetivo el diseño de una instalación experimental para generar dardos de fuego. La instalación forma parte del estudio del efecto dominó mediante el impacto de un dardo de fuego contra una tubería para el transporte de fluidos.

El diseño posee una altura máxima de 2,05 m, una longitud máxima de 1,04 m y un grosor de 0,4 m situado en el laboratorio I5.1 del edificio I de la Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE).

Las consecuencias de este proyecto son las futuras emisiones de dióxido de carbono (CO_2), generado por la combustión de propano (C_3H_8). Para poder estimar la emisión producida por un dardo de fuego, considerando el de mayor consumo de combustible, se realizan los siguientes cálculos suponiendo una combustión ideal.

$$\begin{aligned} & \text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O} \\ & 3,87 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg de C}_3\text{H}_8}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ mol de C}_3\text{H}_8}{44,10 \text{ kg de C}_3\text{H}_8} \times \frac{3 \text{ moles de CO}_2}{1 \text{ mol de C}_3\text{H}_8} \times \frac{30 \text{ kg de CO}_2}{1 \text{ mol de CO}_2} = \\ & = 0,12 \text{ kg de CO}_2/\text{s} \end{aligned}$$

Por lo tanto, en el peor de los casos, un dardo de fuego emite 0,12 kg de CO_2 cada segundo. La contaminación generada por el uso de la instalación queda estipulada a la duración y repeticiones de los ensayos.

Una aproximación a la contaminación generada de forma anual es suponer que se realizan 4 ensayos a la semana con una duración de 10 min cada uno en un periodo de 4 semanas de campañas al año. Esta suposición otorga una emisión anual de 1.152 kg de CO_2 .

6.2 Alternativas del proyecto

La única alternativa a este proyecto es la alternativa cero (no realización del proyecto). La principal razón de la solución adoptada pese a los efectos sobre el medio ambiente es la necesidad de crear un ambiente de estudio controlado que se aproxime a la realidad para poder prevenir accidentes que involucren dardos de fuego que desencadenen un efecto dominó.

6.3 Identificación y cuantificación de los posibles efectos del proyecto

En este apartado se estudian los posibles efectos que puede provocar el proyecto sobre el medio ambiente durante su abandono. Como se ha expuesto anteriormente, el principal impacto ambiental de este proyecto radica en su posterior uso para futuros estudios que involucren la combustión de propano.

El principal efecto directo en el uso de la instalación es la emisión de CO_2 proveniente de la combustión de propano que, como se ha calculado previamente, supondría aproximadamente una emisión anual de 1.152 kg de CO_2 . Este valor puede aumentar o reducirse en función del uso de la instalación tras el abandono de este proyecto.

Por otro lado, la existencia y razón de uso de esta instalación produce un efecto positivo. Este proyecto es una herramienta para el estudio del análisis del efecto dominó por el impacto de dardos de fuego en tuberías de transporte de fluidos o futuros estudios que contribuyen a la comprensión de accidentes de este tipo y la correspondiente elaboración de medidas de prevención y protección.

Finalmente, las medidas de protección desarrolladas aportarán un beneficio social y económico. Por un lado reducirán los costes económicos causados por los daños a las infraestructuras que han sufrido un accidente que involucre fuego (restauración de los desperfectos, instalaciones afectadas no operativas, etc.) y por otro lado los daños sociales que provoca un accidente que involucre fuego (personas heridas y/o muertas).

6.4 Conclusiones

Producir el efecto negativo es inevitable y puede ser considerado como compatible al efecto positivo que genera este proyecto. Con tal de minimizar el impacto ambiental es necesario hacer un uso correcto de la instalación.

7 ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado se realiza un análisis económico del proyecto. En este análisis se tiene en consideración los costes de recursos humanos y los costes de construcción, materiales y servicios.

El coste de recursos humanos se asocia al coste de horas trabajadas por el autor de este proyecto, la doctora de investigación que ejerce como tutora del proyecto y el compañero de investigación que realiza su tesis doctoral. Primero de todo se considera el sueldo mínimo de un ingeniero químico en prácticas como colaborador de trabajo de investigación, el cual es de 26.255,09 € anuales (BOE, 2018) para un grupo profesional de categoría 6 y aplicando una jornada de trabajo de 8h para 250 días al año, el sueldo mínimo es de 20,23 € la hora.

Para el sueldo de una doctora en ingeniería química es de 40.451,09 € anuales (BOE, 2018) para un grupo profesional de categoría 8. Aplicando una jornada de trabajo de 8h para 250 días al año, el sueldo mínimo es de 13,13 € la hora. Se tiene en cuenta el contrato para la duración del proyecto (no se tiene en cuenta días festivos).

El sueldo de un investigador en formación es de 31.902,94 € anuales (BOE, 2018) para un grupo profesional 7. Aplicando una jornada de trabajo de 8h para 250 días al año, el sueldo mínimo es de 15,95 € la hora. El investigador en formación colabora con el autor de este proyecto durante el desarrollo de la instalación.

La Tabla 7.1 recopila las horas invertidas en las distintas actividades junto a su coste.

Tabla 7.1. Coste asociado a recursos humanos

Concepto	Salario (€/h)	Horas	Costes (€)
Ingeniero en practicas	13,13		
Búsqueda de información bibliográfica		32	420,16
Búsqueda de materiales y empresas		59	774,67
Estudio y elección de componentes		55	722,15
Desarrollo del diseño		180	2.363,4
Estudio de nivel de riesgo		24	315,12

Redacción de la memoria del proyecto	216	2.836,08
Investigador en formación	15,95	
Colaboración en la búsqueda de información, componentes y desarrollo del diseño	326	5.199,7
Directora del proyecto	20,23	870
TOTAL		30.231

El coste de construcción, materiales y servicios es detallado de forma conjunta en la Tabla 7.2, la cual recopila el coste de contratación de la empresa Swagelok para el montaje de la instalación, las pruebas de seguridad y los planos del diseño junto al coste de materiales proporcionado por su compañía, el coste de contratación de la compañía Repsol como proveedor legal de propano y el coste material para la fuente de alimentación de la electroválvula.

Tabla 7.2. Coste asociado a los materiales, la construcción y servicio de compañías

Concepto	Unidades	Costes (€)
Contratación de la compañía Swagelok		
Coste de materiales, ensamblaje, pruebas y planos		8.503,88
Contratación de la compañía Repsol		
Contrato		18,8
Botella de propano 35 kg	1	62,10
Fianza		7,28 ^a
Costes de materiales		
Fuente de alimentación fija (24 V y 3 A)	1	51,43
TOTAL		8.643,49 ^b

^a El coste de la fianza incluye el rellenado de hasta 12 botellas.

^b El coste total incluye ha sido calculado contemplando el IVA (21%).

El coste total del proyecto, teniendo en cuenta los costes de recursos humanos y los costes de materiales, construcción y servicio de compañías, es de 38.874,49 €.

8 CONCLUSIONES

En este apartado se exponen las conclusiones obtenidas de la instalación llevada a cabo en este proyecto y las recomendaciones o líneas futuras que puede optar este proyecto.

En primer lugar, las conclusiones son resumidas en los siguientes párrafos:

- Se han alcanzado los objetivos de diseño establecidos desarrollando en cada etapa un mejor diseño hasta finalizar con la construcción de la instalación a manos de una empresa especializada. Este proceso ha seguido los criterios establecidos en el diseño conceptual.
- La aplicación de las normativas estipuladas por el Boletín Oficial del Estado, la construcción y pruebas realizadas por la empresa Swagelock y la elaboración de un manual de operaciones garantizan la seguridad de la instalación.
- La instalación desarrollada permitirá tanto el estudio del efecto dominó como el estudio de dardos de fuego contribuyendo en gran medida a la obtención de datos experimentales para poder generar modelos matemáticos acordes a los datos obtenidos.

Finalmente, es necesario contemplar de forma resumida las diversas acciones o líneas futuras de investigación en base a este proyecto:

- Diseño del segundo módulo para el estudio del efecto dominó conformado por la tubería de transporte de fluidos.
- Elaboración de un elemento compatible con la instalación para generar dardos de fuego de forma vertical.
- Rediseño del panel de regulación para el uso y la medición de fluidos en estado líquido-vapor en la instalación.
- Rediseño del soporte de la bombona para el suministro de combustible líquido en la instalación.

BIBLIOGRAFÍA

Abdolhamidzadeh, B. *et al.* (2011) «Domino effect in process-industry accidents - An inventory of past events and identification of some patterns», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Elsevier B.V., 24(5), pp. 575-593. doi: 10.1016/j.jlp.2010.06.013.

BOE (2013) *Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental*. España. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2013/BOE-A-2013-12913-consolidado.pdf>.

BOE (2018) *Resolución de 26 de julio de 2018, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el Convenio colectivo general de la industria química*. España. Disponible en: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-11368.

Casal, J. (2018a) «Fire Accidents», en Science, E. (ed.) *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. Segunda. Elsevier B.V., pp. 75-150. doi: 10.1016/B978-0-444-63883-0.00003-4.

Casal, J. (2018b) «Introduction», en Science, E. (ed.) *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. Segunda. Elsevier B.V., pp. 1-24. doi: 10.1016/B978-0-444-63883-0.00001-0.

Casal, J. (2018c) «Source Term», en Science, E. (ed.) *Industrial Safety Series*. Segunda. Elsevier B.V., pp. 25-74. doi: 10.1016/B978-0-444-63883-0.00002-2.

Cepsa (2001) «Manual de instalaciones de GLP». Madrid: Opción K, Comunicación visual, S.L., p. 299.

Darbra, R. M., Palacios, A. y Casal, J. (2010) «Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences», *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 183(1-3), pp. 565-573. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.061.

Foroughi, V. (2018) *Risk analysis of domino effect in pipelines*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Gómez-Mares, M. (2009) *Estudio experimental y modelización matemática de dardos de fuego, TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/93791%0A> (Accedido: 27 de enero de 2010).

Laboureur, D. M. *et al.* (2016) «Experimental study on propane jet fire hazards: Assessment of the main geometrical features of horizontal jet flames», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Elsevier Ltd, 41, pp. 355-364. doi: 10.1016/j.jlp.2016.02.013.

Landucci, G. *et al.* (2013) «Detailed Studies of Domino Scenarios», en Reniers, G. and y Cozzani, V. (eds.) *Domino Effects in the Process Industries*. Primera. Elsevier B.V., pp. 229-243. doi: 10.1016/b978-0-444-54323-3.00011-7.

Landucci, G., Cozzani, V. y Birk, M. (2013) «Heat Radiation Effects», en Reniers, G. and y Cozzani, V. (eds.) *Domino Effects in the Process Industries: Modelling, Prevention and Managing*. Primera. Elsevier B.V., pp. 70-75. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00005-1.

Palacios, A. y Casal, J. (2011) «Assessment of the shape of vertical jet fires», *Fuel*, 90(2), pp. 824-833. doi: 10.1016/j.fuel.2010.09.048.

Palacios Rosas, A. (2011) *Study of jet Fires geometry and radiative features*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/93798>.

Patej, S. y Durussel, T. (2007) «Experimental analysis of jet fire impingement on industrial pipe», en *11 International Interflam Conference*. Londres, Reino Unido: Interscience communications, pp. 1389-1395. Disponible en: <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00976194>.

Ramírez-Camacho, J. G. *et al.* (2015) «Analysis of domino effect in pipelines», *Journal of Hazardous Materials*, 298, pp. 210-220. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.05.033.

Ramírez-Camacho, J. G. *et al.* (2017) «Assessing the consequences of pipeline accidents to support land-use planning», *Safety Science*, 97, pp. 34-42. doi: 10.1016/j.ssci.2016.01.021.

Rengel, B. *et al.* (2018) «A priori validation of CFD modelling of hydrocarbon pool fires», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 56, pp. 18-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.08.002>.

Reniers, G. (2010) «An external domino effects investment approach to improve cross-plant safety within chemical clusters», *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), pp. 167-174. doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.12.013.